This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

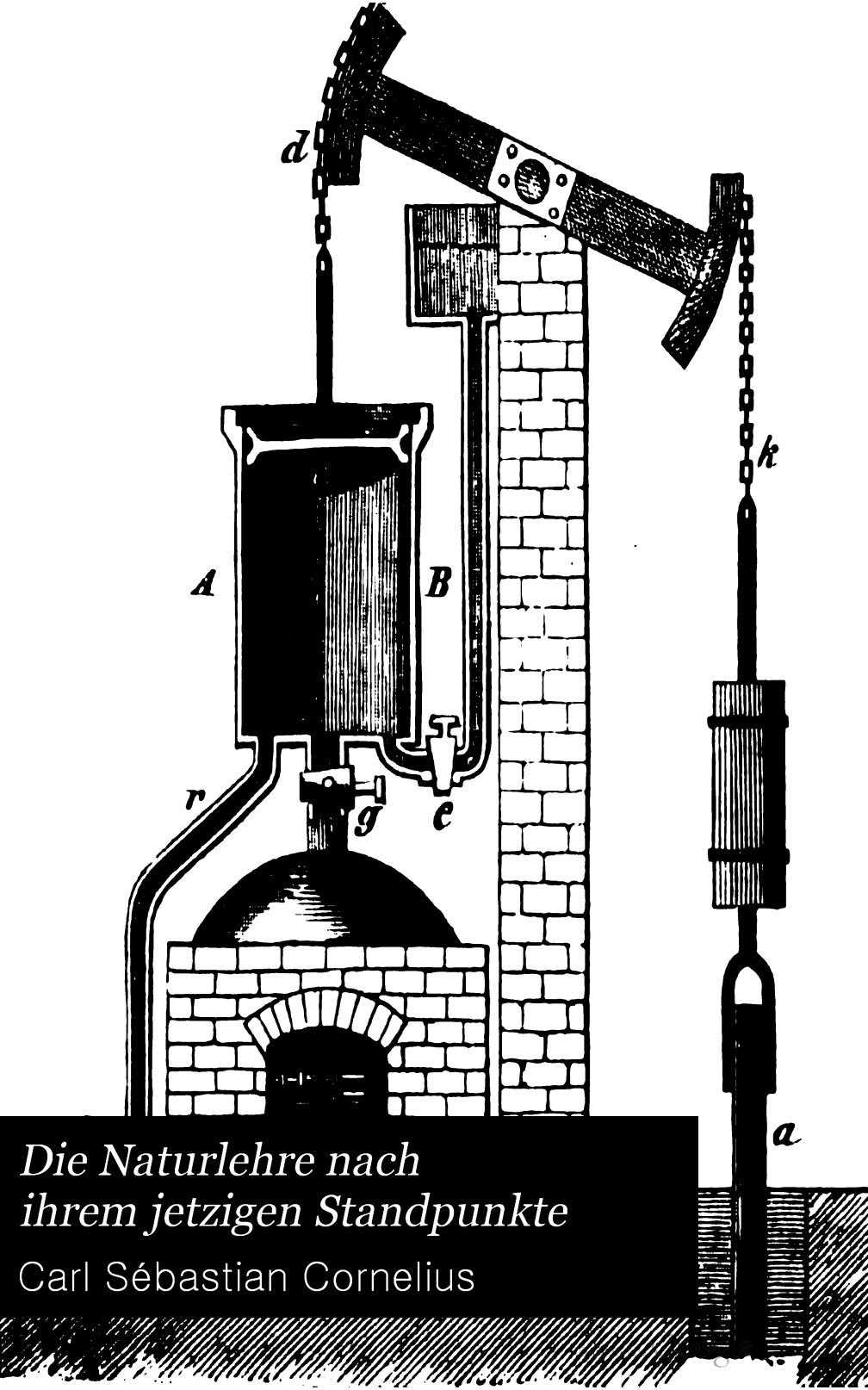
+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

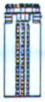
Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`



Die Naturlehre nach ihrem jetzigen Standpunkte

Carl Sébastian Cornelius

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK GENT



Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Die Naturlehre

nach

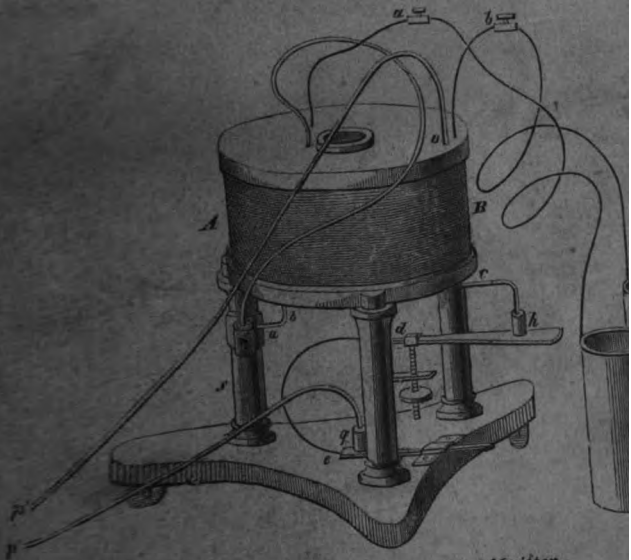
ihrem jetzigen Standpun

mit Rücksicht auf den

inneren Zusammenhang der Erscheinunge

Von

Dr. Carl Sebastian Cornelius.



Mit 417 eingedruckten Holzschnitten.

Leipzig,
Friedrich Fleischer.
1849.

Digitized by Google

Phys. 155a

Digitized by Google

Die Naturlehre

nach

ihrem jetzigen Standpunkte

mit Rücksicht auf den

inneren Zusammenhang der Erscheinungen.

Von

Dr. Carl Sebastian Cornelius.

Mit 417 eingedruckten Holzschnitten.

629

Leipzig,
Friedrich Fleischer.
1849.

Digitized by Google

BIBLIOTHÈQUE
DE L'UNIVERSITÉ
DE GAND

Digitized by Google

Vorrede.

Man hat mit vollem Rechte die raſchen Fortſchritte der Naturwiſſenſchaften, namentlich die der Phyſik und Chemie, bewundert. Verfolgt man nun etwas genauer den Entwickelungsgang der heutigen Naturwiſſenſchaft, ſo bemerkt man bald, daß ſie den jetzigen Grad ihrer Ausbildung auf dem Wege der Erfahrung durch die ſogenannte inductive Methode erlangt hat. Scharfe Beobachtungen, genaue Verſuche und die Fackel der mathematiſchen Analyſis ſind die mächtigen Hebel, denen die Naturwiſſenſchaften ihre Erweiterung großentheils zu verdanken haben. Die reine Empirie freilich hält ſich zunächſt an das, was Beobachtungen und Verſuche unmittelbar darbieten, ſie denkt noch nicht; werden aber aus den Reſultaten der Beobachtungen und Verſuche Schlüſſe gezogen in Hinſicht auf den äußeren oder inneren Zuſammenhang der Erſcheinungen, ſo geht die Empirie in Speculation über. Reiner Empirismus, als ſolcher, iſt nicht wohl möglich, man müßte denn abſichtlich auf alles Denken in der Naturwiſſenſchaft Verzicht leiſten. Alles, was wir auf dem Wege der Erfahrung in uns aufgenommen haben, ſetzt gar bald unſer Denken in Bewegung und veranlaßt daſſelbe, die Erſcheinungen aus einem beſtimmten Geſichtspunkte zu betrachten. So kommt man von der Theilbarkeit der Materie aus leicht zur atomiſtiſchen Theorie, welche

Digitized by Google

nun bei der Erklärung der Erscheinungen eine Hauptrolle spielt, und zwar mit Recht, denn die Thatsachen sind dafür. Ohne die atomistische Grundlage möchte die Chemie kaum eine Wissenschaft zu nennen sein, mit der Ausbildung jener hat diese fast gleichen Schritt gehalten.

Jede Wissenschaft strebt nach Harmonie der Gedanken, d. h. nach einem in allen seinen Theilen mit sich selbst zusammenstimmenden Denken. Dabei befolgt sie die Gesetze der natürlichen, sogenannten allgemeinen Logik, indem sie den Widerspruch in allen seinen Gestalten zurückweist. Die naturwissenschaftlichen Begriffe müssen aber nicht blos alle unter einander und jeder mit sich übereinstimmen, sondern auch überdies noch genau den Thatsachen entsprechen, welche durch sie gedacht werden und in ihnen ihre Erklärung finden sollen. Dies ist nur möglich, wenn die Theorie genau von dem Gegebenen in seiner ganzen individuellen Bestimmtheit ausgeht; eine Speculation, welche hiervon nicht ausgeht, führt vielleicht zu Manchem, was leidlich klingen mag, gewiß aber zu keiner wahren Naturlehre. Durch Nichtbeachtung dieses wichtigen Umstandes hat die sogenannte Naturphilosophie längere Zeit einen verderblichen Einfluß auf die Naturwissenschaft geübt; sie war so kühn, die Welt der Erscheinungen ohne gehörige Rücksicht auf die gegebenen Formen der Erfahrung a priori zu deduciren. Die Folgen eines solchen Unternehmens konnten nicht ausbleiben. Die Thatsachen der Erfahrung widersprachen und wurden nun, aus Liebe zu den einmal gefaßten Meinungen, so lange beschnitten, bis sie zu den a priori construirten Formeln paßten. An die Stelle der wirklichen Natur, wie sie uns Allen in bestimmten Thatsachen gegeben ist, trat eine erdichtete, — ein Phantasiegebild.

Soll das Material, welches uns Versuche und Beobachtungen liefern, zu einer Wissenschaft im strengen Sinne verarbeitet werden, so kann es dabei allerdings ohne philosophischen Geist nicht hergehen. Nur kommt es darauf an, daß die Theorie, wie sie sich auch nennen mag, stets festen Grund und Boden und eine heilige Scheu vor den Thatsachen habe, durch welche sich die Natur kenntlich macht. Denn die Theorie will doch am Ende nichts Anderes als die gegebenen Erscheinungen erkennen oder sie auf ihren letzten Grund, so weit dies

Digitized by Google

möglich ist, zurückführen; wie sollte ihr dies nun möglich sein, wenn sie unbewandert ist in der Sprache der Erscheinungen? Ohne Theorie würden wir aber den Zusammenhang der Naturerscheinungen nicht näher kennen lernen, es würde keine Wissenschaft geben, welche geeignet wäre, uns von dem Wirken der Natur ein passendes Bild darzubieten. Auch begnügt sich der Geist keineswegs mit dem was er vermittelst der Sinne einfach wahrnimmt, vielmehr treiben ihn die sinnlichen Wahrnehmungen selbst von der bloßen Erfahrung zur Theorie fort. Nicht einmal der äußere Zusammenhang der Naturerscheinungen ergiebt sich ohne Weiteres durch die sinnliche Wahrnehmung, sondern erst durch eine Reihe von Schlüssen, welche der Geist nach bestimmten Gesetzen aus den Beobachtungen und Versuchen ableitet. Der menschliche Geist strebt nach einer begriffsmäßigen Erkenntniß des Angeschauten. Sind nun die Begriffe, welche uns die Anschauungen der Naturdinge eingeben, mit Widersprüchen behaftet, so kann er nicht umhin, dieselben in einem gesetzmäßigen Denken so lange umzuarbeiten, bis sie den Erscheinungen Genüge leisten.

Unter den verschiedenen philosophischen Lehren kenne ich keine, welche die Macht des Erfahrungsmäßig-Gegebenen so vollständig anerkennt und dasselbe so gewissenhaft zur Basis ihrer Untersuchungen macht, als die Lehre Herbart's. Indem sie von den allgemeinen Formen der Erfahrung, wie selbe allen Naturdingen zukommen, ausgeht, gelangt sie, freilich auf dem Wege metaphysischer Speculation, zu allgemeinen Principien, mit deren Hülfe sie zu den gegebenen Erscheinungen zurückkehrt und zu Resultaten führt, deren Uebereinstimmung mit der Erfahrung zuweilen wahrhaft überraschend ist. Die in unserem Buche enthaltenen Betrachtungen stützen sich zum Theil auf die genannte Lehre. Doch wird man darin keine eigentliche metaphysische Speculation finden; ich bin weit entfernt, den Leser damit zu behelligen, denn ich weiß sehr wohl, daß die heutige Zeit einer derartigen Speculation von Herzen abhold ist. Die oben erwähnte Naturphilosophie hat auch dies großentheils verschuldet. Trotz ihrer Scheu vor der letzteren ist es gleichwohl der Naturforschung daran gelegen, mit philosophischem Geiste tiefer in den Zusammenhang der

Digitized by Google

Erscheinungen einzubringen, denn am Ende ist es doch nur wieder die wahre Naturphilosophie, zu welcher die Naturwissenschaft hinstrebt.

Wir werden nun in diesem Werke von den einfachsten sinnlichen Wahrnehmungen, wie sie Jeder bei offenen Sinnen macht, ausgehen, wir werden im gehörigen Zusammenhange fortschreiten zu den Thatsachen, welche die Erscheinungen bei schärferen Beobachtungen und Versuchen darbieten, und aus ihnen ohne Aufwand von Speculation Schlüsse ableiten, welche in Rücksicht auf die Grundlage der Naturwissenschaft von Wichtigkeit sind. Dabei werden wir die einfachsten Gesetze der natürlichen Logik, welche zu beachten jede Wissenschaft nicht umhin kann, befolgen, und das Princip der Induction und Analogie wird uns leiten. Auf diese Weise werden wir zu einer Theorie gelangen, welche, wenn man will, atomistisch genannt werden kann, und die vielleicht geeignet ist, der Naturwissenschaft als Grundlage zu dienen.

Gemeinhin legt man den Atomen Kräfte bei, vermöge deren sie auf einander einwirken sollen. Daß die Elemente oder auch Stoffe einander anziehen und unter Umständen abstoßen, ist Thatsache, jene Kräfte aber, welche dies Geschäft besorgen sollen, sind Voraussetzungen, mit denen man vorläufig nur eine leere Stelle ausgefüllt hat. Es ist Pflicht der Wissenschaft, das, was die Erscheinungen wirklich als Thatsache darbieten, scharf von dem zu unterscheiden, was man häufig ganz unwillkürlich hinzugedacht hat. Diese Regel wird man im Buche befolgt finden. Unsere Theorie verwirft die Existenz von besonderen Kräften der Elemente als eine unwissenschaftliche Voraussetzung, aus der sich im Grunde nichts erklären läßt. Die Materie ist uns gegeben, die Körper zerfallen in eine gewisse Anzahl von Grundstoffen, welche wieder die Frage nach ihrer Zusammengesetztheit aufregen. Auf Grund der Erfahrung und vermöge einer Reihe von Schlüssen, zu denen die Erscheinungen selbst den nothwendigen Antrieb geben, gelangen wir zu einfachen Elementen, aus denen wir uns die Körperwelt zusammengesetzt denken müssen. Verschiedenheit und Gegensatz der Körper führt zu einer Verschiedenheit und einem Gegensatze der Elemente, aus denen sie zusammengesetzt sind. Indem wir so genöthigt werden, die Elemente nach ihrer

Digitized by Google

Gleich- oder Ungleichartigkeit mit einander zu vergleichen, entsteht die ganz natürliche Frage, ob denn der Gegensatz der Elemente nicht einen Erfolg haben werde, falls sie zusammentreffen. Es wird sich zeigen, daß dies allerdings der Fall ist, sofern die Elemente für einander durchdringlich sind. Man wird hier den wahrscheinlichen Grund der Anziehung und Abstoßung der Elemente finden und bemerken, daß die Undurchdringlichkeit ihr Recht hat, aber nur in einem relativen Sinne, während für die chemische Anziehung theilweise Durchdringung der Elemente nothwendige Bedingung ist. Auch werden wir einfach sehen, daß eine Wirkung in die Ferne zur Erklärung gewisser Erscheinungen nicht unumgänglich nöthig ist, ja daß sich eine solche Wirkung nicht einmal rechtfertigen läßt. Kurz wir werden zu den wesentlichsten Grundzügen einer Theorie gelangen, welche fast alle Attractions- und Repulsionserscheinungen in einem gewissen Sinne ins Gebiet der Chemie zurückführt. Wir betrachten diese Theorie als eine solche, welche der Hauptsache nach in der bisherigen atomistischen Theorie gleichsam eingewickelt liegt und zu der sich die letztere von selbst fortentwickeln muß, wenn ihr Princip consequent festgehalten und alles Fremdartige und Ungehörige von ihr abgeschieden wird. Die atomistische Ansicht, wohl aufgefaßt, bereitet den wahren Grund und Boden, auf dem sich die gesammte Naturlehre zu erheben hat. Je weiter sich jene ausbildet (und einer höheren Ausbildung ist sie in hohem Grade fähig), desto heller wird auch der äußere und innere Zusammenhang der Naturerscheinungen hervortreten. Ein derartiger Fortschritt der Wissenschaft wird freilich im Allgemeinen nur sehr allmälig geschehen; eine Theorie, welche den Erfahrungen selbst ihren Ursprung verdankt, muß meist bedächtig vorwärts gehen, die Erscheinungen selbst hinreichend sprechen lassen und häufig rückwärts blicken, um keine übereilten Deutungen zu wagen. Ueberdies wird man wahrnehmen, daß unsere Theorie zu ihrer Vollendung die Hülfe der Mathematik erfordert. —

Hinsichtlich der Erscheinungen selbst habe ich außer den Quellen, so weit sie mir zu Gebote standen, noch einige der besseren physikalischen Werke benutzt, so weit dies passend und zweckdienlich war

Digitized by Google

Ich habe die einzelnen Erscheinungen, wie es die Experimentalphysik verlangt, möglichst scharf gezeichnet und sie meist allen theoretischen Betrachtungen vorausgehen lassen, damit der empirische Eindruck unverfälscht sich geltend mache. Ueberhaupt habe ich das Werk so angelegt, daß es einem größeren Publikum zugänglich sein wird und füglich als Lehrbuch auftreten kann. Wohl hätte ich rücksichtlich mancher in verschiedenen Abschnitten vorkommenden Betrachtungen noch Einiges beizufügen, doch das Buch mag nun selbst sprechen. Mein Wunsch ist, daß die in ihm enthaltenen Lehren einer gründlichen und ernsten Prüfung anheim fallen mögen.

C. Cornelius.

Digitized by Google

Inhaltsverzeichniß.

Erster Theil.

Von den wägbaren Stoffen.

Seite

Erster Abschnitt. Von der Materie überhaupt.

Erstes Kapitel. Allgemeine Grundbetrachtungen 1

Zweites Kapitel. Von der Bildung der Materie 12

Zweiter Abschnitt. Vom Gleichgewicht fester Körper.

Erstes Kapitel. Zusammensetzung und Zerlegung sogenannter Kräfte 33

Zweites Kapitel. Von der Schwere und dem Gleichgewichte fester, schwerer Körper 42

Drittes Kapitel. Vom Gleichgewichte an den sogenannten einfachen Maschinen 50

Viertes Kapitel. Vom Gleichgewichte der Theilchen fester Körper unter einander 60

Dritter Abschnitt. Von den Bewegungsgesetzen der Körper, namentlich fester.

Erstes Kapitel. Bewegung überhaupt und Mittheilung derselben 65

Zweites Kapitel. Von der beschleunigten Bewegung 75

Drittes Kapitel. Von der Centralbewegung und Schwungkraft . . 92

Viertes Kapitel. Von den Hindernissen der Bewegung 100

Vierter Abschnitt. Vom Gleichgewichte tropfbar flüssiger und gasförmiger Körper.

Erstes Kapitel. Vom Gleichgewicht tropfbarer Flüssigkeiten 105

Zweites Kapitel. Vom Gleichgewicht tropfbarer Flüssigkeiten in Beziehung auf Molecülarkräfte 120

Drittes Kapitel. Vom Gleichgewicht der Gase und von dem atmosphärischen Druck insbesondere 129

Fünfter Abschnitt. Von den Bewegungsgesetzen tropfbarer und gasförmiger Körper.

Erstes Kapitel. Von der Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten 153

Zweites Kapitel. Bewegung gasförmiger Körper 162

Sechster Abschnitt. Von der Akustik.

Erstes Kapitel. Von der Wellenbewegung im Allgemeinen und von den Gesetzen des Schalles insbesondere 166

Zweites Kapitel. Von den stehenden Schwingungen 185

Drittes Kapitel. Einige nähere Betrachtungen über den Schall als solchen und über die Mittheilung der Schwingungsbewegung zwischen verschiedenen Körpern 211

Viertes Kapitel. Stimme und Gehör 218

Digitized by Google

Zweiter Theil.

Von den unwägbaren Stoffen oder sogenannten Imponderabilien.

Ueber die Imponderabilien im Allgemeinen und über die Schwere insbesondere.

Seite

Erster Abschnitt. Vom Lichte.

Erstes Kapitel. Ueber die Erscheinungen des Lichtes im Allgemeinen 238
Zweites Kapitel. Von der Reflexion oder Spiegelung des Lichtes 242
Drittes Kapitel. Von der Brechung des Lichtes 251
Viertes Kapitel. Von der Zerlegung und Zusammensetzung des Lichtes 268
Fünftes Kapitel. Vom Sehen und von den optischen Instrumenten 276
Sechstes Kapitel. Theoretische Ansicht der Lichterscheinungen . . . 300
Siebentes Kapitel. Von den Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichtes 306
Achtes Kapitel. Von der doppelten Brechung des Lichtes 329
Neuntes Kapitel. Von der Polarisation des Lichtes 341
Zehntes Kapitel. Von den chemischen Wirkungen des Lichtes . . . 370

Zweiter Abschnitt. Von der Wärme.

Erstes Kapitel. Ausdehnung der Körper durch die Wärme 378
Zweites Kapitel. Von der Aenderung des Aggregatzustandes durch die Wärme 402
Drittes Kapitel. Von der Anwendung des Dampfes 438
Viertes Kapitel. Von der Wärmecapacität 452
Fünftes Kapitel. Von den Bewegungsgesetzen der Wärme 459
Sechstes Kapitel. Von den Quellen der Wärme 474
Siebentes Kapitel. Von der Theorie der Wärmeerscheinungen . . 488

Dritter Abschnitt. Vom Magnetismus.

Erstes Kapitel. Von den magnetischen Erscheinungen überhaupt . . 501
Zweites Kapitel. Vom Erdmagnetismus 508
Drittes Kapitel. Von den Wirkungsgesetzen magnetischer Kräfte . . 522
Viertes Kapitel. Von der Erregung des Magnetismus 533

Vierter Abschnitt. Von der Elektricität und den damit zusammenhängenden Erscheinungen.

Erstes Kapitel. Von den elektrischen Erscheinungen überhaupt . . . 540
Zweites Kapitel. Erklärung verschiedener Apparate, welche auf dem Gesetze der elektrischen Vertheilung beruhen, und anderer hierher gehöriger Erscheinungen 554
Drittes Kapitel. Von der atmosphärischen Elektricität 573
Viertes Kapitel. Elektricität durch Berührung. Galvanismus . . 583
Fünftes Kapitel. Vom Elektromagnetismus 636
Sechstes Kapitel. Elektricität durch Induction 666
Siebentes Kapitel. Thermoelektricität. Thermomagnetismus . . . 683
Achtes Kapitel. Von der thierischen Elektricität 690

Digitized by Google

Erſter Abſchnitt.

Von der Materie überhaupt.

Erſtes Kapitel.

Allgemeine Grundbetrachtungen.

1. Die Naturlehre iſt eine Wiſſenſchaft, welche zu ihrer Grundlage ſinnliche Wahrnehmung hat. Dies erhellt ſogleich, wenn man ſich erinnert, daß wir vom Sein der Naturdinge nicht anders wiſſen, denn auf Veranlaſſung der äußeren Anſchauung. Der Blinde, der Taube, der Geruchs-, Geſchmacks- und Wahrnehmungsloſe überhaupt, — wer alles dies zumal iſt, hat keine Empfindungen, keine Vorſtellungen und deshalb auch keinen Begriff vom Sein. So gewiß nun dies auch iſt, ſo müſſen wir doch geſtehen, daß durch die bloße ſinnliche Auffaſſung die wahre Beſchaffenheit der Dinge nicht erkannt wird.

Die Natur zeigt einen großen Reichthum; was ſie uns zunächſt bietet, ſind Verbindungen ſinnlicher Merkmale. Jeder Körper giebt ſich zu erkennen durch eine Summe von Eigenſchaften, wodurch er ſich zugleich von allen anderen unterſcheidet. Aber die ſämmtlichen in der Wahrnehmung gegebenen Eigenſchaften der Dinge ſind lediglich relativ. Das heißt: damit ein Körper ſeine ſinnlichen Eigenſchaften offenbare, ſind beſondere Umſtände erforderlich. So hat ein Körper Farbe, aber nur unter Vorausſetzung des Lichtes. Er klingt, aber nur dann, wenn er geſtoßen wird, o. dglch., und gewöhnlich nicht ohne Luft. Er hat ein beſtimmtes Gewicht, aber nur auf der Erde; auf der Sonne wäre daſſelbe größer, auf dem Monde klei-

Digitized by Google

ner, und im unendlich leeren Raume wäre es gar nicht mehr vorhanden. Er ist zerbrechlich, wenn eine fremde Gewalt auf ihn einwirkt; hart oder weich, wenn man in ihn eindringen will; schmelzbar unter Voraussetzung des Feuers, u. s. w. Also giebt keine dieser Eigenschaften das an, was er an und für sich selbst ist, d. h. das eigenthümliche Was oder die Qualität der Dinge wird uns durch die Sinne nicht bekannt.

Doch halten wir als Thatsache fest, daß ein Körper nur dann, wenn er mit anderen zusammen kommt, seine sinnlichen Eigenschaften verräth. Hat unser Blick auch nicht die Macht, das innere Wesen des Körpers zu durchschauen, so können wir ihn gleichwohl an seinen Eigenschaften äußerlich erkennen und von anderen unterscheiden. Aber die Körper sind nicht die Summen ihrer Eigenschaften und umgekehrt diese nicht jene. Der Körper stellt sich uns zunächst als eine Einheit dar, während seine Merkmale gewöhnlich eine Vielheit bilden. Heiße der Körper selbst A und seien seine Eigenschaften a, b, c, d.... Nun ist nicht A — a, oder — b, oder — c u. s. w., und eben so wenig A — a + b + c + ..., sondern A besitzt a, b, c, ..., z. B. Silber besitzt die Eigenschaft oder das Kennzeichen der weißen Farbe u. s. f. Auch pflegt man in der That nicht zu sagen, der Körper ist seine Eigenschaft, sondern er hat dieselbe. Wird dies durch sämmtliche Eigenschaften durchgeführt, so ist A nur noch der Besitzer derselben und im Grunde nicht durch sie zu erkennen, da er nur den gemeinschaftlichen Anknüpfungspunkt für selbige darbietet, d. h. er ist ihr Träger. Dieser Träger der sinnlichen Merkmale eines Körpers oder die eigenthümliche Substanz desselben ist also der Qualität nach unbekannt; er ist und bleibt uns nur der unbekannte Besitzer dieser Merkmale.

Gleichwohl hat das Obige noch seine Richtigkeit, daß wir nämlich an den sinnlichen Eigenschaften die Dinge äußerlich erkennen und von einander unterscheiden können, selbst dann noch, wenn wir das Band zwischen den verschiedenen Eigenschaften eines und desselben Dinges nicht anzugeben wissen.

Daß aber die verschiedenen sinnlichen Merkmale Eines Körpers nur ein zufälliges Aggregat bilden, d. h. daß keines derselben auf seine nothwendige Verbindung mit dem anderen hinweist, ist leicht einzusehen. Daß dem Golde, weil es gelb aussieht, sein bestimmtes Gewicht, oder weil es so schwer ist, die gelbe Farbe zukomme; daß das Silber hell klingen und sein Klang mit der weißen Farbe oder dessen Schmelzbarkeit verbunden sein müsse, — die Nothwendigkeit

Digitized by Google

davon läßt sich, wie man zugeben muß, mittelst der Empfindung nicht wahrnehmen. Dies gilt von jedem sinnlichen Dinge mit mehreren Merkmalen. Jede einzelne sinnliche Empfindung desselben ist so wesentlich von den übrigen verschieden, daß man von keiner behaupten kann, in ihr und in so fern sie wahrgenommen wird, seien zugleich und nothwendiger Weise die übrigen mitgegeben. Dessenungeachtet bilden die sinnlichen Merkmale eines materiellen Dinges eine innige Complexion, vermöge deren das Ding als Ein Ding und zwar als dieses und kein anderes vorgestellt wird, weshalb wir uns eben auch genöthigt sehen, demselben eine Substanz als Träger seiner sinnlichen Merkmale zuzuschreiben.

Obgleich also die Eigenschaften eines Körpers in keiner nothwendigen Verbindung mit einander stehen, so können wir dieselben doch in keinem willkürlichen Denken von einander trennen. D. h. wir können nicht beliebig die weiße Farbe des Silbers mit dem specifischen Gewichte des Goldes, oder mit der gelben Farbe des letzteren irgend eine Eigenschaft des ersteren verknüpfen, weil sonst statt des gegebenen Körpers ein ganz anderer gesetzt würde, von welchem unsere sinnliche Wahrnehmung nichts weiß.

2. Andererseits lehrt uns aber die Beobachtung, daß die Dinge der Natur einen Wechsel in ihren sinnlichen Eigenschaften erfahren. In diesem Falle pflegen wir dann zu sagen, es habe eine Veränderung stattgefunden. So z. B. wenn ein starrer Körper die flüssige Aggregatform annimmt, oder wenn irgend ein Körper diejenigen Merkmale nicht mehr verräth, welche wir bisher an ihm beobachtet haben.

So oft nun irgend ein materielles Ding einen solchen Wechsel in seinen Eigenschaften erfahren hat, zeigt uns die Wahrnehmung, daß dies in Folge seines Zusammentreffens mit anderen Dingen geschehen ist. Es würde auch ein Widerspruch entstehen, wenn man annehmen wollte, daß der Körper sich selbst verändert habe. Warum sollte er sich auch selbst untreu werden? Deshalb setzt der Verstand voraus, daß etwas Anderes und Fremdes als Ursache müsse herbeigekommen sein, um das Neue zu stiften, was in dem Alten nicht von selbst habe werden können. Denn keine Wirkung ohne Ursache.

Wie nun das Ding, welches wir als Ursache betrachten, es anfange, um in einem anderen neue Eigenschaften hervorzurufen oder alte zu entfernen, darüber belehrt uns die Erfahrung nicht. Wollten wir uns erlauben, den Dingen Kräfte beizulegen, vermöge deren sie aufeinander einwirken, so würden wir damit in unserer Erkenntniß

Digitized by Google

um keinen Schritt weiter kommen, sondern nur ein Räthsel an die Stelle des anderen setzen. Denn hat das Ding, welches wir Ursache nennen, eine Kraft, wodurch es veranlaßt wird, in einem anderen eine Veränderung hervorzubringen, so ist diese Kraftäußerung selbst wieder eine Veränderung in seinem Zustande, was die Annahme einer neuen Kraft erfordert und so ohne Ende fort. Da es nicht unsere Absicht ist, x durch y zu erklären, so halten wir uns an die sinnliche Wahrnehmung und an das, was in unserem Denken nothwendig daraus folgt. Sagt uns daher auch die Erfahrung nicht, wie die Dinge gegenseitig in einander eingreifen, so stellt sie uns doch die Thatsache hin, daß ein Ding nur in so fern seine sinnlichen Eigenschaften wechselt, als es mit einem oder einigen anderen Dingen zusammentrifft.

3. Nun kommt aber die Chemie mit ihren Erfahrungen hinzu und belehrt uns, daß sehr viele Körper, welche wir uns als einfach vorstellen, dies in der Wirklichkeit nicht sind, da es ihr gelungen ist, dieselben in ihre Bestandtheile zu zerlegen. So dachte man sich früher das Wasser als ein Element, d. h. man hielt dasselbe für einfach, während man jetzt weiß, daß es aus zwei Stoffen besteht, die man Sauerstoff und Wasserstoff nennt; und was man sonst nur Erden nannte, das sind jetzt Verbindungen metallischer Elemente mit dem Sauerstoffe, u. s. w. So hat uns die Chemie bis jetzt 55 Stoffe aufgeführt, aus deren wechselseitigen Verbindungen sie alle zusammengesetzten Körper darzustellen weiß. Man nennt diese Stoffe Elemente, weil die Chemie nicht im Stande ist, dieselben in einfachere Bestandtheile zu zerlegen.

Von diesen sogenannten Elementen gilt nun großentheils, was wir oben von den zusammengesetzten Körpern gesagt haben: jedes derselben giebt sich zu erkennen durch eine Summe von Merkmalen, wodurch wir es zugleich von allen anderen unterscheiden. Auch verräth es seine Merkmale nur unter bestimmten Umständen, und wenn es einige derselben wechselt, so rührt dies daher, weil es mit anderen in Gemeinschaft getreten ist. Wechselt die Gemeinschaft, so wechseln auch die sinnlichen Merkmale, welche uns die Wahrnehmung dieser Gemeinschaft darbot.

Was nun während dieser Gemeinschaft in den Stoffen eigentlich vorgehet, darüber belehrt uns die Beobachtung nicht, sondern sie findet nur als Thatsache vor, daß, wenn irgend ein Stoff eines seiner Merkmale mit einem neuen vertauscht, dies die Folge seiner Gemeinschaft mit einem anderen Stoffe ist, gerade so wie er nur unter be-

Digitized by Google

ſonderen Umſtänden diejenigen Eigenſchaften zeigt, welche ihn charakteriſiren und von anderen unterſcheiden. Derjenige Stoff nun, welcher zu einem anderen hinzukommen muß, um in ſeiner Gemeinſchaft mit demſelben neue Merkmale der Wahrnehmung darzubieten, wird als Urſache der betreffenden Veränderung betrachtet. Und ſo zwingen uns die chemiſchen Erfahrungen durchweg, für jedes beſondere Merkmal, was ein Stoff in der Wahrnehmung zeigt, auch eine beſondere Urſache anzunehmen, welche in der Verbindung dieſes Stoffes mit einem oder mehreren anderen zu ſuchen iſt. Fällt daher aus einer Complexion von Merkmalen a b c, durch welche ſich irgend ein chemiſches Element in der Erſcheinung darſtellt, das Merkmal c weg, ſo fallen auch die deshalb angenommenen Urſachen weg; tritt aber ein neues Merkmal d hinzu, ſo muß man dafür auch neue Urſachen ſetzen. D. h. mit anderen Worten: das Element iſt aus ſeiner bisherigen Gemeinſchaft mit gewiſſen anderen Elementen heraus und in eine neue Gemeinſchaft mit anderen von jenen verſchiedenen Elementen eingetreten.

Ueberdies lehrt die Erfahrung noch ganz beſtimmt, daß ſich die Elemente während ihrer Gemeinſchaft mit anderen ihrer eigenthümlichen Qualität nicht entäußert haben, da ſie unverſehrt mit allen ihren früheren Eigenſchaften wieder daraus hervorgehen.

4. Nun drängt ſich aber der Chemie nothwendiger Weiſe die Frage nach der Theilbarkeit der Materie auf. Schon die Thatſache, daß ſie viele Körper in einfachere Beſtandtheile zerlegt hat, welche ein unabhängiges Daſein von einander haben, mußte die Frage hervorrufen, ob denn dieſe Beſtandtheile nicht wiederum aus anderen zuſammengeſetzt ſeien.

Obgleich ſie nun jene ſogenannten Grundſtoffe nicht auf einfachere zurückzuführen vermochte, ſo kann man doch keineswegs poſitiv behaupten, daß dieſe Stoffe nicht wieder Verbindungen anderer ſind.

Bekanntlich laſſen ſich viele Beiſpiele anführen, daß die Theilbarkeit der Materie weit über die Gränzen ſinnlicher Wahrnehmung hinausgeht. Man denke nur, abgeſehen von Metalldrähten, welche feiner als ein Haar ſind, an alle mikroſkopiſchen Gegenſtände, die ſelbſt wieder ihre Theilchen haben, an den Moſchus, welcher Jahre lang ein großes Zimmer mit einem ſtarken Geruche erfüllen kann, ohne merklich an Gewicht zu verlieren.

Jeder Körper iſt ein Unterſchied ausgedehnter Theile, deren jeder beſondere, wie das Ganze, ebenfalls ausgedehnt iſt. Huldigt man nun hier der gewöhnlichen geometriſchen Vorſtellungsart, ſo erfolgt

Digitized by Google

auf die Frage, wie viele Theile hat ein materielles Ding, die Antwort: unendlich viele. Der geometrischen Anschauung macht es keine Mühe, jede räumliche Ausdehnung, sei es nun eine Linie, Fläche oder ein Körper, einer unendlichen Theilung zu unterwerfen, wobei jeder Theil ähnlich dem Ganzen bleibt. Denn die Geometrie hat es mit der bloßen Ausdehnung als solcher zu thun.

Kann man aber diese Vorstellungsweise im strengen Sinne auf die Materie, auf das, was den Raum erfüllt, übertragen? Wird diese Frage bejaht, so beginnen wir, indem wir Materie denken, eine Theilung, die in's Unendliche fortgesetzt werden muß, weil jeder Theil noch als ein Ausgedehntes soll gedacht werden. Unsere Vorstellung der Materie ist dann jederzeit noch im Werden begriffen und wird niemals fertig, weil alle unendlich vielen Theile zusammengefaßt werden müssen, um das Ganze zu erhalten. Das unabhängige Dasein aller materiellen Theilchen erreichen wir im Denken niemals, so lange wir die Theilchen erst durch eine Theilung aus dem Ganzen (der Materie) hervorgehen lassen. Wir erreichen demnach auch niemals das, was unserer Meinung nach an der Materie wahrhaft ist, denn wir kommen nie zu allen, nie zu den letzten Theilchen, eben weil die Theilung ohne Ende fortgesetzt oder die Unendlichkeit derselben übersprungen werden müßte.

Der Gedanke der unendlichen Theilbarkeit der Materie ist ungereimt und kann nicht in der Physik geduldet werden. Denn eine Unendlichkeit von Theilen annehmen, heißt so viel als nichts annehmen. Die Unendlichkeit läßt sich nicht erschöpfen. Das Sein des Körpers würde sich in Nichts verlieren. Um diesen Gegenstand noch mehr zu erläutern, denke man sich einen beliebigen Klumpen Materie und führe durch denselben einen bestimmten Schnitt; so liegt die Möglichkeit am Tage, daß man diesen nämlichen Schnitt auf unendlich vielfache Weise anders hindurchführen kann. Hiermit ist wirklich die ganze, unendliche Theilung auf einmal vollzogen, und man hat die letzten Theile wenigstens im Denken erreicht. Aber was sind nun diese Theile? Jeder Theil muß (wie bei einer geometrischen Theilung) gleichartig sein dem als gleichartig gedachten Ganzen. Dieses letztere wurde aber nur in so fern gleichartig gedacht, als dasselbe Materie darstellt, auf deren besondere Qualität hier nichts ankommt. Also ist jeder Theil wieder Materie und deshalb auch ausgedehnt und kann demnach wieder getheilt werden. Hierdurch wird nun die vorige Voraussetzung der schon fertigen Theilung umgestoßen. Man beginnt auf dieselbe Weise von Neuem zu theilen, und geräth

Digitized by Google

damit in einen Zirkel, der keinen Ruhepunkt darbietet. Diese Betrachtung sollte nun veranlassen, jene falsche Anwendung der Geometrie auf die Materie zurückzuweisen und den Schluß zu ziehen: daß die Materie zuletzt nicht wieder aus Materie besteht, sondern daß ihre wahren Bestandtheile schlechthin einfach sind.

Diesen Schluß würden vielleicht die Physiker längst gezogen haben, wenn nicht die Schwierigkeit, aus diesen unräumlichen Elementen die raumerfüllende Materie zu construiren, sie davon zurückgeschreckt hätte. Um dieser Schwierigkeit willen nahm man an, daß alle Körper aus kleinsten Theilchen zusammengesetzt seien, die untheilbar sind und deshalb Atome genannt werden.

Aber man erkennt leicht, daß die Schwierigkeit nur scheinbar durch eine willkürliche Fiction gehoben ist. Denn diese Atome, so klein sie auch angenommen werden mögen, haben doch immer wieder Ausdehnung, und wo Ausdehnung ist, da giebt es auch Theile, gleichviel, ob sie sich gesondert darstellen lassen oder nicht. Was sind nun diese Theile? Man sieht, daß der oben angeführte Zirkel sich hier wieder einstellt, und daß man nur dadurch aus demselben herauskommt, wenn man die letzten Elemente der Materie als einfach im strengsten Sinne annimmt, von denen aber jedes durch seine Qualität positiv bestimmt ist. Diese wären dann die eigentlichen Atome. Allerdings würde es dann eine Aufgabe der Physik sein, aus solchen Elementen die mit Raumbestimmungen behaftete Materie zu construiren, wobei man freilich gewisser speculativer Betrachtungen nicht wohl entrathen könnte.

Da es nun unsere Absicht nicht ist, auf dergleichen Betrachtungen hier einzugehen, so werden wir uns der bisherigen atomistischen Theorie bedienen, da sich dieselbe in anderer Hinsicht und mit den gehörigen Modificationen als eine wohl berechtigte Vorstellungsweise betrachten und alle anderen Ansichten an Fruchtbarkeit hinsichtlich der Erklärung der Erscheinungen weit hinter sich läßt.

5. Ihr zufolge sind also alle Körper, wie wir schon angeführt haben, aus nicht weiter theilbaren Elementen, die man Atome nennt, zusammengesetzt. Nun findet sich aber in der Natur eine Menge von Körpern, deren Eigenschaften so verschieden sind, daß wir nothwendig annehmen müssen, die Atome, aus denen sie zusammengesetzt sind, seien verschiedener Qualität. So verhalten sich z. B. Blei und Schwefel so außerordentlich verschieden, daß wir diese Verschiedenheit nur durch die Annahme erklären können, daß die Atome des Bleies von anderer Qualität sind, als die des Schwefels.

Digitized by Google

Ferner zeigt die Chemie, daß alle Körper, deren Zerlegung ihr gelungen, d. h. daß alle chemisch zusammengesetzten Körper nicht aus gleichartigen, sondern aus ungleichartigen Theilen bestehen, obgleich sie in ihrer Gemeinschaft ein gleichartiges Ganze darstellen. Demgemäß definirt man auch die chemische Verbindung als eine Vereinigung ungleichartiger Stoffe zu einem gleichartigen Ganzen. So ist Wasser aus zwei ungleichartigen Bestandtheilen (Sauerstoff und Wasserstoff) zusammengesetzt, obschon es eine homogene Masse bildet; so besteht Zinnober aus Schwefel und Queckfilber, Kochsalz aus Chlor und Natrium, u. s. w.

Sollen wir nun hiernach wirklich annehmen, daß die Atome der Metalle und anderer Körper, die man noch nicht weiter hat zerlegen können, gleichartig sind? Der Theorie zufolge müssen sie nothwendiger Weise aus Atomen bestehen, und da es thatsächlich feststeht, daß nur ungleichartige Stoffe fähig sind, in ein Verhältniß eigentlich chemischer Anziehung zu einander zu treten, so können wir der Analogie und dem Principe der Induction gemäß schließen, daß auch die Metalle aus ungleichartigen Theilchen (Atomen) zusammengesetzt sind. Dasselbe gilt natürlich von allen Körpern, die man einfache nennt, weil man sie nicht weiter zerlegen kann. Ausnahmen hiervon bilden vielleicht nur einige Gase, die zur Gattung derjenigen gehören, welche nicht durch Druck und Kälte in die tropfbar flüssige Form übergeführt werden können.

Obige Thatsache führt nothwendig auf den Gedanken, daß Ungleichartigkeit der Elemente überhaupt das Princip der Anziehung sei. Nehmen wir aber an, daß auch gleichartige Atome sich anziehen und einen Körper constituiren können, so erlauben wir uns eine Voraussetzung, die durch keine eigentliche chemische Thatsache belegt wird und obendrein den Begriff der chemischen Verbindung (als einer Vereinigung ungleichartiger Stoffe zu einem gleichartigen Ganzen) über den Haufen wirft. Was die Zusammengesetztheit der Metalle und anderer Körper anlangt, so werden wir gelegentlich noch einmal darauf zurückkommen.

6. Außerdem lehrt die Erfahrung, daß die Körper nicht immer genau dasselbe Volumen einnehmen, d. h. daß sie sich ausdehnen und zusammendrücken lassen. So kann ein Körper durch Druck und Erkaltung verkleinert, durch Spannung und Erwärmung vergrößert werden.

Setzt man voraus, daß die Atome undurchdringlich für einander sind, so läßt sich die Ausdehn- und Zusammendrückbarkeit der Kör-

Digitized by Google

per nur durch die Annahme erklären, daß die Atome nicht in unmittelbarer Berührung stehen, sondern durch Zwischenräume getrennt sind, durch deren Vergrößerung oder Verkleinerung das Volumen der Körper zu- oder abnehmen muß. Die Chemie hat aber Beispiele, daß zwei Stoffe während ihrer Verbindung mit einander keinen größeren Raum einnehmen, als jeder derselben für sich, und man hat hiernach wohl oft genug behauptet, daß selbst der dichteste Körper mehr leeren als erfüllten Raum habe, was freilich, man muß es gestehen, etwas fabelhaft klingt. Obgleich es in unserer Erfahrung Körper giebt, welche einander nicht zu durchdringen vermögen, so kann man doch keineswegs positiv behaupten, daß auch bei chemischen Verbindungen keine Durchdringung der Stoffe stattfinde. Da die Atome, welche einen Körper constituiren, einander anziehen müssen, so sieht man auch nicht ein, warum dieselben nicht bis zur Berührung einander anziehen sollen, sofern man von fremdartigen Umständen abstrahirt.

Andererseits stellen sich die chemischen Verbindungen als gleichartig dar, wennschon sie aus heterogenen Stoffen bestehen. Wie ein Stück Silber im Ganzen, so ist es in jedem seiner Punkte weiß, glänzend, dehnbar, u. s. w., oder man nehme lieber statt dessen Zinnober, welcher aus Quecksilber und Schwefel besteht, aber trotzdem durch das beste Mikroskop betrachtet als eine vollkommen gleichartige Masse erscheint.

Woher nun diese Gleichartigkeit, wenn die Atome blos neben und außer einander liegen? Voraussetzung der Durchdringlichkeit der Atome macht dieselbe schon begreiflicher. Läge im Begriffe der Durchdringung ein Widerspruch, so müßte man schlechthin davon ablassen. Aber worin besteht dieser Widerspruch? Zu einem Widerspruche gehören wenigstens zwei entgegengesetzte Glieder, welche in einem und demselben Begriffe dasselbe sein sollen. Nehmen zwei Atome dieselbe Raumstelle ein, durchdringen sich also dieselben, so sehe ich keinen Widerspruch. Dagegen würde ein solcher vorhanden sein, wenn ein und dasselbe Atom zwei verschiedene Orte des Raumes zugleich einnehmen sollte, weil es dann zugleich sein und nicht sein müßte. Wenn ein Ding zugleich ist und nicht ist, dann hat man einen Widerspruch. So kann auch nicht ein und dieselbe räumliche Begränzung rund und eckig sein, weil beides in Einen Gedanken zusammengefaßt sich gegenseitig auslöschen, auf 0 reduciren würde. Eine viereckige Kugel ist ein logisches Unding, d. h. ein Widerspruch. Hingegen kann man sich alle Körper in Einer Kugel liegend denken, ohne daß ein Widerspruch entsteht.

Digitized by Google

Die Atome können sowohl in einander als außer einander sein; das erstere enthält so wenig einen Widerspruch als das letztere. Da wir also im Begriffe der Durchdringlichkeit keinen Widerspruch finden können, so werden wir uns desselben zur Erklärung der Erscheinungen bedienen. Eine Theorie aber, welche den Naturerscheinungen genügen soll, muß sowohl die Gleichartigkeit der chemischen Verbindungen, welche ungleichartige Stoffe enthalten, zu erklären wissen, als auch diejenige Undurchdringlichkeit, welche die Erfahrung beim Zusammentreffen körperlicher Massen wirklich an den Tag legt. Auch wolle man sich noch erinnern, daß wir die Undurchdringlichkeit eigentlich nur bei solchen Massen klar wahrnehmen, welche nicht geradezu chemisch auf einander wirken. Wir müssen bekennen, daß die vorgebliche Undurchdringlichkeit schlechterdings kein Datum der Erfahrung ist, welche hierüber nichts entscheidet.

7. In der Natur giebt es eine Menge von Körpern, welche Flüssigkeiten und Gase mit Leichtigkeit durchlassen. Diese Eigenschaft haben sie großentheils von den Zwischenräumen, welche sich zwischen ihren verschiedenen Theilchen befinden und Poren genannt werden. Die natürlichen Gewebe des Thier- und Pflanzenreichs, künstliche Gewebe, welche aus einzelnen Fäden bestehen, viele mineralische Substanzen, besonders solche, deren Theilchen unregelmäßig gelagert sind, zeigen diese Eigenschaft (Porosität). In der Regel führt man hinsichtlich der Porosität den Hydrophan an, ein Mineral, welches zum Kieselgeschlecht gehört, im gewöhnlichen Zustande nur durchscheinend ist, kurze Zeit aber in Wasser eingetaucht, durchsichtig wie Glas wird, da das Wasser in seine Poren eindringt, gleich dem Oel in die Poren des Papiers. Selbst bei Metallen findet man Porosität. So überdeckt sich eine mit Wasser angefüllte Kugel von Gold, wenn sie einem hinreichend starken Drucke ausgesetzt wird, auf der ganzen Oberfläche mit ganz kleinen, dem Thau ähnlichen Tröpfchen.

Während nun viele Körper Flüssigkeiten mit Leichtigkeit durchlassen, giebt es wieder andere, die nur nach längerer Zeit und unter einem mehr oder weniger starken Drucke von Flüssigkeiten durchdrungen werden können; endlich aber auch solche, welche eher zerbrechen, als daß sie Flüssigkeiten oder Gase durchlassen, z. B. Glas. So ist die Porosität eine Eigenschaft, welche unter den Körpern zwar weit verbreitet ist, aber doch nicht im strengen Sinne als eine allgemeine Eigenschaft derselben betrachtet werden kann. Denn aus den Erfahrungen, die wir darüber besitzen, läßt sich durchaus nicht der Schluß

Digitized by Google

ziehen, daß auch zwiſchen den letzten Elementen der Materie, d. h. hier den Atomen derſelben, leere Räume vorhanden ſeien.

8. Da ſich die Theilchen eines feſten Körpers nur mit Ueberwindung eines Widerſtandes von einander trennen laſſen, ſo muß natürlich irgend eine Urſache vorhanden ſein, welche die Theilchen feſter Körper in ihrer gegenſeitigen Lage hält, oder das Princip deſſen iſt, was man Cohäſion nennt. Denn man ſieht klar, daß die Körper nicht durch eine bloße Nebeneinanderlagerung der Atome gebildet ſein können, weil ſie ſonſt nur eine unzuſammenhängende Maſſe ausmachen würden. Legt man daher den Atomen eines Körpers eine gegenſeitige Anziehung bei, ſo läßt ſich wohl deſſen Cohäſion hieraus begreifen, inſofern dadurch die Atome in einer beſtimmten gegenſeitigen Lage verharren müſſen. Aber man ſieht nicht ein, warum ſie nun auch ein gleichartiges Ganze mit beſtimmter innerer Structur darſtellen müſſen. Denn trotz ihrer gegenſeitigen Anziehung liegen ſie doch nur neben einander und ſind daher eher noch einem Sandhaufen, deſſen einzelne Theile durch irgend einen Umſtand gezwungen ſind, ihre Lage beizubehalten, vergleichbar, als einem durchaus homogenen Körper, wie ſolchen eine chemiſche Verbindung in der Wirklichkeit darſtellt.

Was nun die gegenſeitige Anziehung der Atome anlangt, ſo können wir dieſelbe keiner beſonderen Kraft zuſchreiben, und wir haben ſchon im §. 1 bemerkt, daß durch die Annahme einer ſolchen Kraft nichts gewonnen wird. Was ſollen wir uns auch für einen Begriff machen von einer Kraft, die zwar mit den Atomen innigſt verbunden, doch noch eine beſondere Exiſtenz für ſich hat? Wie ſoll man ſich überhaupt dieſe Verbindung zwiſchen Kraft und Stoff denken? Man ſieht leicht, daß man damit nur ein Räthſel auf das andere häuft.

Eben ſo wenig iſt eine Wirkung in die Ferne denkbar, d. h. es iſt undenkbar, daß ein Atom unmittelbar auf ein anderes von ihm entferntes wirke, alſo da wirkſam ſei, wo es nicht iſt.

Dieſe Annahme widerlegt ſich ſchon ſelbſt durch die Geſetze, an welche ſie geknüpft iſt. Denn die Wirkung der Kraft ſoll abnehmen mit wachſender Entfernung, gleichviel nun, ob mit der einfachen oder (wie bei der Maſſenanziehung) mit dem Quadrate derſelben. Hier wird alſo der Zwiſchenraum zwiſchen den auf einander wirkenden Atomen oder Maſſen nicht als unbedeutend, ſondern als beſtimmend das Quantum der Wirkung, als der Träger eines Geſetzes angeſehen. Darin liegt nun das Bekenntniß: der Zwiſchenraum ſei nicht leer.

Digitized by Google

Wenn er es wäre, so wäre er in der That nichts, und es ließe sich durchaus kein Grund denken, warum die größere oder geringere Entfernung einen Unterschied in der Wirkung ergeben sollte. Gäbe es eine Wirkung durch den leeren Raum, so müßte sie in allen Entfernungen gleich stark, — es müßten die Atome oder Massen allgegenwärtig für einander sein. Weil dies nun in der Wirklichkeit nicht der Fall ist, sondern die Wirkung mit der größeren Entfernung abnimmt, so beruht sie auf einer Vermittelung, auf welche es für jetzt noch nicht ankommt.

Uebrigens scheint auch nur bei der Massenanziehung und allenfalls bei der elektrischen und magnetischen eine Wirkung in die Ferne stattzufinden, während bei der chemischen Anziehung erfahrungsmäßig durchweg die innigste Berührung der Stoffe nöthig ist.

Nur unter Voraussetzung der Durchdringlichkeit der Atome läßt sich die Möglichkeit einer Einwirkung derselben auf einander begreiflich machen.

Zweites Kapitel.

Von der Bildung der Materie.

9. Schon in den beiden ersten §§. unserer Betrachtungen haben wir den Umstand in Erwägung gezogen, daß sich jedes materielle Ding als eine Summe von Merkmalen in der Erscheinung darstellt, und daß es diese Merkmale nur dann zu erkennen giebt, wenn es mit anderen Dingen in irgend eine Gemeinschaft tritt.

Hierauf belehrte uns die Chemie, daß die meisten Körper aus ungleichartigen Stoffen zusammengesetzt seien, und von hier aus weiter gehend kamen wir zu dem Satze: daß man sich alle Körper zusammengesetzt denken könne aus untheilbaren Elementen, die man Atome nennt.

Jedes dieser Elemente nun, in so fern ihm überhaupt das Sein soll beigelegt werden, muß durch seine Qualität positiv bestimmt sein. Denn ohne eine bestimmte Qualität würde es gar nicht sein können. Auch muß wenigstens die Qualität (das Wesen) eines jeden Elementes einfach und nicht mit inneren Gegensätzen behaftet sein, wenn dieselbe ohne Widerspruch soll gedacht werden können. Es hat daher keine Kräfte, auch keine Triebe und Vermögen, wodurch es befähigt

Digitized by Google

wird, auf ein anderes Element (wohl gar in die Ferne) zu wirken. Alle diese Annahmen würden die Qualität der Elemente verunreinigen, auch wissen wir nicht, wie wir solche Kräfte, Triebe und Vermögen mit der Qualität, durch welche jedes Element das ist, was es ist, in Verbindung bringen sollen. Alle ursprüngliche Vielheit in der Qualität eines Elementes würde es selbst in Vieles auflösen, es würde kein Element sein. Wir betrachten also diese Elemente als für sich bestehende Einheiten, die auf keinerlei Weise zusammengesetzt sind.

Jedes solcher Elemente nun, sofern man es an und für sich betrachtet, ist lediglich sich selbst gleich und zeigt nicht das Geringste, was an eigentliche Materie erinnern könnte. Aber jedes in Gemeinschaft mit anderen Elementen stellt dasjenige als Erscheinung heraus, was man Materie nennt. Wechselt die Gemeinschaft, so wechselt auch die Erscheinung.

Worin diese Gemeinschaft der Elemente eigentlich bestehet, ist eine Frage, die nun beantwortet werden kann, obgleich uns die Erfahrung hierüber nicht ohne Weiteres belehrt. Nur dies zeigen die chemischen Thatsachen ganz bestimmt, daß die Stoffe in's Zusammen gerathen, d. h. in irgend eine Gemeinschaft treten müssen, wenn sie auf einander einwirken sollen. Auch ist so viel gewiß, daß irgend Etwas geschehen muß, was weder in Einem Element, noch in der bloßen Vielheit derselben, so lange sie vereinzelt ist und eine bloße Summe bildet, seinen Grund hat, wenn mehrere Elemente zusammengenommen irgend einen Körper darstellen sollen. Obgleich das eigenthümliche Was oder das Wesen der Elemente unbekannt ist und bleiben wird, weil es in keiner Art wahrnehmbar ist, so muß es doch so beschaffen sein, daß es in der Gemeinschaft der Elemente die Eigenschaften der Dinge, wie sie sich in der Wirklichkeit offenbaren, hervorbringt.

10. Auf Grund der Erfahrung und vermöge eines nothwendigen Fortschritts im Denken hat sich also der Begriff der Gemeinschaft der Elemente erzeugt. In diesem Begriffe der Gemeinschaft liegt eine Beziehung der Elemente auf einander, wonach dieselben unter sich vergleichbar sein müssen.

Nämlich von der an sich unerkennbaren, einfachen Qualität der Elemente läßt sich doch so viel einsehen, daß dieselbe bei mehreren, falls sie wirklich mit einander verglichen werden könnten, entweder gleich oder conträr entgegengesetzt sein müsse.

Im ersten Falle sind die Elemente, da kein innerer Grund der

Digitized by Google

gegenseitigen Hinderung vorhanden ist, einander vollkommen zugänglich und durchdringlich. Die Elemente können dann gleichgiltig in einander verharren oder auch durch einander hindurchgehen, sofern man von anderweitigen Umständen abstrahirt. Denn es ist nicht abzusehen, wie gleichartige Elemente im Falle ihres Zusammentreffens auf einander einwirken könnten. Da jedes dem anderen hinsichtlich der Qualität völlig gleich ist, so kann keinem von dem anderen etwas widerfahren. Unter besonderen Umständen wird allerdings auch ein Einfluß gleichartiger Elemente auf einander möglich sein.

Im zweiten Falle ist aber an den verglichenen Elementen *Gleiches* und *Entgegengesetztes* zu unterscheiden. Aber das Gleiche und Entgegengesetzte der Qualität sind an den Elementen natürlich keine gesonderten oder trennbaren Stücke; nur die Vergleichung stellt es heraus. So ist z. B. die Empfindung eines wirklich einfachen Tones ein vollkommen sich selbst gleiches Eins; indessen zusammengefaßt mit anderen Tönen nimmt er eine große Menge unterscheidbarer und dennoch nicht gesondert darstellbarer Gegensätze an. Die Empfindung einer einfachen Farbe steht in einem unendlich mannigfachen Contraste gegen andere Farben; an ihr, wie bei den Tönen, läßt sich das Gleiche und Entgegengesetzte im vergleichenden Vorstellen unterscheiden, wenngleich nicht wirklich zertheilen. Wasserstoff steht in einem anderen Verhältnisse zum Chlor- als zum Stickstoff, oder Schwefel, oder Phosphor, oder Brom, oder Jod u. dgl. Die Qualität eines jeden Elementes, verglichen mit der Qualität eines anderen von der nämlichen Art oder Gattung, erlaubt die Unterscheidung — wenn auch nicht wirkliche Trennung — dessen, was dem anderen gleich und entgegengesetzt ist. Die Gegensätze können nun sowohl nach Beschaffenheit, als auch nach Größe verschieden sein. So kann zwischen den Qualitäten je zweier Elemente das Gleichartige oder Entgegengesetzte vorherrschend sein. Und wie bei den Farben Blau dem Roth mehr entgegengesetzt ist, als Violet, oder in der Reihe der Töne gis dem cis weniger als a und mehr als g: so sollen auch die Qualitäten je zweier Elemente A und B gedacht werden, daß nämlich dem A irgend ein drittes C mehr entgegengesetzt sein könnte, als B, und daß zwischen A und M oder N eine ganz andere Art des Gegensatzes stattfinden könne, als zwischen A und B. Wasserstoff ist zwar dem Sauerstoff entgegengesetzt, aber auch, und zwar in einer anderen Art, dem Kohlenstoff und wieder anders dem Chlor und dem Stickstoff u. s. w. Wenn man will, so kann man überhaupt das Verhältniß zweier Töne oder Farben als das allernächste Gleichniß für das Ver-

Digitized by Google

halten zweier Elemente hinsichtlich des Gegensatzes ihrer Qualitäten nehmen.

11. Der Gegensatz unter den Elementen hat nun im Falle ihres Zusammentreffens einen realen Erfolg.

Die Elemente, als solche, wenn kein äußerer oder innerer Grund entgegentritt, behindern sich in Nichts. Einen äußeren Grund der Störung kann es für die Elemente, so lange sie außer einander sind, nicht geben. In diesem Falle haben sie gar keine Bedeutung für einander. Aber einen inneren Grund der gegenseitigen Hinderung haben sie, sobald sie zusammentreffen, an ihren Gegensätzen, welche alsdann zur Wirksamkeit kommen.

Steht nämlich die Qualität eines Elementes A mit der Qualität eines anderen B im Gegensatze, so sollte, sobald diese Elemente zusammengerathen, das Entgegengesetzte ihrer Qualitäten sich aufheben. Dies ist aber unmöglich, weil das Entgegengesetzte kein abtrennbares Stück ist, sondern nur in unauflöslicher Verbindung mit dem, was nicht im Gegensatze steht, die eigenthümliche Qualität des Elementes ausmacht. Also muß jedes der Elemente, so gewiß es unaufhebbar ist, in seinem eigenen Innern und nach seiner eigenen Qualität gegen die Störung, die ihm von dem Entgegengesetzten des anderen droht, sich selbst erhalten als das, was es ist. Man kann auch die Qualitäten zweier entgegengesetzter Elemente A und B bildlich durch die Formeln a + b und a + (— b) darstellen, wo aber a und b keine wirklichen Glieder in den Qualitäten der Elemente bedeuten, sondern in unauflöslicher Verbindung mit einander als ein vollkommen sich selbst gleiches Eins gedacht werden müssen. Ebenso bedeutet das (— b) in der Formel für die Qualität des B etwas durchaus Positives, aber dem + b in A geradezu Entgegengesetztes, was durch das Zeichen (—) angezeigt ist. Kommen nun solche Elemente A und B zusammen, so sollte sich ihr Entgegengesetztes (+ b und — b) tilgen und nur ihr Gleichartiges (a) übrig bleiben. Da aber letzteres mit dem ersteren unzertrennlich verbunden ist, so bleibt nichts Anderes übrig, als daß sich jedes Element gegen das andere in seiner Qualität behauptet als das, was es ist. Die Störung, welche erfolgen würde, wenn das Entgegengesetzte der beiden Elemente sich aufheben könnte, gleicht einem Drucke, die Selbsterhaltung einem Widerstande. Sie bestehen also in der Lage, worin sie sich befinden, wider einander, ihr Zustand ist Widerstand. Man erkennt, daß es sich hier um eine Abänderung der Qualität handelt, die jedes Element des Gegensatzes wegen von dem

Digitized by Google

anderen erleiden sollte, wogegen es sich aber selbst erhält als das, was es ist. Störung sollte erfolgen, Selbsterhaltung hebt die Störung auf, dergestalt, daß sie gar nicht eintritt.

Wenn man will, so kann man auch statt Störung und Selbsterhaltung Action und Reaction sagen, wobei aber noch zu erinnern, daß beide in Einen Act zusammenfallen. Die Reaction, welche unmittelbar dem Gegensatze gilt, ist eigentlich dasjenige, was hier wirklich geschieht.

Die Selbsterhaltung ist also nichts Anderes, als ein Bestehen gegen eine Störung, welche in dem Verhältnisse der Qualitäten je zweier Elemente liegt. Auch geschieht stets Zweierlei zugleich: nämlich A erhält sich als A und das Element B als B.

Jede Reaction, die von einem Elemente ausgeht, wenn es sich gegen ein bestimmtes andere in seiner Qualität behauptet, hat demnach einen eigenthümlichen Charakter. Ist der Gegensatz zwischen den Elementen A und C ein anderer als der zwischen A und B, so muß auch die Reaction des A gegen C verschieden sein von der Reaction des nämlichen A gegen B, u. s. w.

Die Reactionen erfolgen unausbleiblich aus dem Gegensatze der Qualitäten, wenn die Elemente zusammentreffen. Sie fallen daher ganz weg bei zwei vollkommen gleichartigen Elementen, da zwischen diesen kein Gegensatz stattfindet. Wo kein Gegensatz, da kann auch keine Störung und deshalb auch keine Reaction eintreten. Auch können sie nicht erfolgen bei solchen Elementen, die rein verschieden sind und etwa wie eine Farbe und ein Ton hinsichtlich der Qualitäten zu einander stehen. Denn auch bei ihnen ist kein eigentliches Verhältniß des Gegensatzes vorhanden. Damit solche Elemente auf einander wirken, müssen besondere Umstände obwalten.

In den Reactionen liegt der Grund der Anziehung der Elemente zu einander, sowie überhaupt das, was man Causalität oder das Verhältniß zwischen Ursache und Wirkung nennt. Auch zeigt sich hier die Nothwendigkeit der Durchdringlichkeit der Elemente, weil sonst die Elemente einander unzugänglich sein würden und deshalb der Gegensatz der Qualitäten keinen wirklichen Erfolg haben könnte.

12. Um die Elemente dem sinnlichen Vorstellen näher zu bringen, wollen wir dieselben als Kügelchen betrachten, da kein Grund vorhanden ist, die Ausdehnung nach verschiedenen Seiten hin ungleichförmig anzunehmen. Ebenso müssen wir diese Kugeln als gleich ansehen, weil zur Annahme einer Ungleichheit der Elemente in Absicht auf Größe, wie auf Gestalt nichts nöthigt. Es versteht sich

Digitized by Google

von selbst, daß jedes dieser Kügelchen für sich innerlich als vollkommen gleichartig gedacht werden muß.

Man habe zwei Elemente, die in einem gleichen, d. h. in einem solchen Gegensatze stehen, daß das eine eben so sehr von dem anderen, als dieses von jenem gestört wird. Sind nun diese Elemente theilweise in einander eingedrungen, so muß auch in jedem von ihnen eine theilweise oder dem Grade nach abgestufte Reaction, sowie ihre Durchdringung vermindert ist, stattfinden. Doch geht dabei natürlich die Reaction in dem ganzen Element, sowohl in den durchdrungenen, als auch nicht durchdrungenen Theilen gleichmäßig vor sich, da die Qualität der Elemente nicht aus einzelnen Theilen zusammengesetzt ist. Kommen entgegengesetzte Elemente von der angegebenen Art zusammen, so müssen sie sich in Folge der Reaction, welche jedes von ihnen im Moment des Eindringens gegen das andere ausübt, von entgegengesetzten Seiten her vollständig in einander bewegen; sie drücken sich gleichsam gegenseitig in einander.

Vermöge ihrer Reactionen verharren sie nothwendig in einander und nichts veranlaßt oder nöthigt sie, aus diesem Zustande herauszutreten.

Jede Reaction hat aber nothwendig ihr bestimmtes Maß, welches nicht überschritten werden kann. Der Grad der Reaction hängt ab von dem Grade der Durchdringung und der höchste Grad tritt dann ein, wenn zwei entgegengesetzte Elemente A und B von der angegebenen Beschaffenheit sich vollständig durchdrungen haben. Zwei solche Elemente bewegen sich also mit beschleunigter Geschwindigkeit in einander.

Wir wollen nun annehmen, ein Element komme zusammen mit zwei anderen, die unter sich von gleicher Qualität sind, während jedes von ihnen, einzeln genommen, mit jenem ersten im Gegensatze steht.

Seien die beiden qualitativ gleichen Elemente A und A', das dritte, jedem einzelnen gleich stark entgegengesetzte, heiße B.

Nun müssen jene beiden (A, A'), sobald sie mit B zusammentreffen, sich gegen dasselbe vollständig in ihrer Qualität behaupten und, während dies geschieht, sollten sie nach dem Obigen ganz in B eindringen. Aber auch B muß sich behaupten und zwar gegen beide A, da es mit jedem von ihnen in demselben Verhältnisse des Gegensatzes steht. Nun kann aber schon ein einziges A unter Voraussetzung vollständiger Durchdringung B zu dem höchsten Grade der Reaction veranlassen. Beide A können nicht zugleich völlig in B eindringen, auch haben sie gewiß keine Veranlassung, gegen B eine größere Reaction auszuüben, als ihnen selbst von Seiten dieses B entgegen-

Digitized by Google

tritt. Während B gegen beide A zugleich reagirt, dringen diese so tief ein, bis ihre Reactionen zusammengenommen, der Intensität nach, gleichgeltend sind der einen vollen (höchsten) Reaction des B. Also kann zwischen den drei Elementen nur eine partiale (theilweise) Durchdringung stattfinden.

Da jedes A wegen des Gegensatzes zu B gegen das letztere reagiren muß, so sollten sie nach unseren anfänglichen Betrachtungen ganz in B eindringen. Daher geht die Attraction voraus. Da sich aber B nicht von beiden A zugleich kann vollständig durchdringen lassen, so scheint es gegen sie eine zurückstoßende Gewalt auszuüben, welche wir Repulsion nennen.

So entsteht eine scheinbare Abstoßung zwischen den Elementen, die eigentlich ebensowohl in A und A' als in B, obgleich nur in Folge des Zusammentreffens derselben, ihren Ursprung hat. Die Repulsion geht aber insofern von B aus, als es der zwiefachen vollständigen Durchdringung, die ihm, dem Einzelnen, von jenen beiden angemuthet wird, nicht entsprechen kann.

Kommt ein drittes gleichartiges Element A hinzu, so wird die Durchdringung noch geringer. Während sich B gegen alle drei A behauptet, dringen diese so tief, bis ihre Reactionen zusammen wieder gleich sind der einen höchsten Reaction des B. Immer ist der Werth der Reaction auf beiden Seiten derselbe. Dringen aber die mehreren Elemente A vermöge der einmal erlangten Bewegung tiefer ein, als dem eben zuvor Gesagten entspricht, so entsteht nothwendig Repulsion, vermöge deren sie wieder aus dem entgegengesetzten Elemente B bis zu einem bestimmten Grade herausweichen müssen. Sie können überhaupt nicht eher ruhen, als bis Anziehung und Abstoßung im Gleichgewichte sind. Auch müssen sämmtliche Elemente zusammen einen bestimmten Raum einnehmen, und als Ganzes ein Klümpchen Materie darstellen, das man kleinstes Massentheilchen (Molekel) nennen kann. Dieses Massentheilchen hat dann auch gemäß dem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion, oder, was dasselbe ist, gemäß dem Grade der partialen Durchdringung der Elemente seine bestimmte Dichtigkeit. Damit aber das Massentheilchen sich vergrößere, darf nur dasselbe wieder umringt werden von mehreren Elementen der ersten Art (B). Diese werden ebenfalls so tief eindringen, als es das Gleichgewicht der Attraction und Repulsion gestattet; und kommen abermals Elemente der zweiten Art (A) hinzu, so werden auch sie so weit als möglich eindringen. Diese Massentheilchen werden zusammen eine körperliche Masse darstellen,

Digitized by Google

welche, obgleich aus ungleichartigen Elementen bestehend, dennoch ein gleichartiges Aussehen haben wird, da jedes Element sich in einem inneren Zustande befindet, der von seiner partialen Durchdringung mit dem entgegengesetzten anderen herrührt.

Der Grund aber, durch welchen die körperliche Masse existirt, beruht nach dem Vorstehenden darin, daß sich der äußere Zustand, die Lage oder Gruppirung der Elemente richten muß nach dem innern Zustande oder nach den Reactionen jedes Elements gegen die, mit welchen es in Gemeinschaft getreten ist.

Aus unserer Entwickelung geht hervor, daß die Ursachen, welche zur Erklärung der Naturerscheinungen angenommen werden müssen, nicht in besonderen Kräften liegen. Denn die Causalität oder das Verhältniß zwischen Ursache und Wirkung entspringt den vorausgehenden Betrachtungen zufolge unmittelbar aus dem Gegensatze, welcher zwischen den Elementen, aber in keinem einzeln genommen liegt. Die Elemente selbst, ganz und ungetheilt, wie sie sind, werden Kräfte oder sind insofern Kräfte, als sie mit anderen von entgegengesetzter Qualität zusammen sind.

13. Ursprünglich ist die Materie starr und strebt zur Starrheit in bestimmter Gestaltung.

Nach dem Früheren erkennt man, daß die gegenseitige Stellung der Elemente bedingt ist durch das Gleichgewicht der Attraction und Repulsion. So müssen zwei gleichartige Elemente A und A', wenn sie in ein ihnen ungleichartiges B eindringen, mit diesem eine gerade Linie bilden, deren Mittelpunkt B ist.

Denn die beiden A werden gleichmäßig, wie wir wissen, wegen der zwischen ihnen entstehenden Repulsion aus dem mittleren B herausgetrieben, indem doch jedes einzeln so tief als möglich eindringt.

Ebenso werden drei gleichartige Elemente A, A', A'', bei gleichem Gegensatze gegen ein anderes B ein gleichseitiges Dreieck um dasselbe bilden, indem sie einander theilweise durchdringen. Ein ungleichseitiges aber wird herauskommen, wenn bei drei ungleichartigen Elementen die verschiedene Größe der Gegensätze den Anziehungen nach der einen oder anderen Seite hin eine verschiedene Stärke giebt.

In allen diesen Fällen entstehen flächenförmige Verbindungen.

Vier gleichartige Elemente (A, A', A'', A'''), wenn sie sich in einem ihnen gemeinschaftlich entgegengesetzten B theilweise durchdringen, werden um dieses ein Tetraëder bilden.

Digitized by Google

Vier ungleichartige Elemente aber, von denen je zwei in einem anderen Gegensatze zu einander stehen, werden sich wegen der verschiedenen Größe der Anziehung nach den verschiedenen Seiten hin zu einem unregelmäßigen Körpertheilchen mit einander verbinden. Aus demselben Grunde wird auch die Dichtigkeit desselben nach verschiedenen Richtungen ungleich sein.

Daher wird es Körper geben, welche man als linienförmig zusammengereihet, andere als flächenförmig geschichtet, noch andere als Aggregate von Klümpchen angehäuft, betrachten muß.

Auch hängt hiermit der Unterschied des faserigen, blätterigen und muscheligen Bruches der Mineralien zusammen.

Also ist mit der Verdichtung der Elemente zur Materie auch eine bestimmte innere Gestaltung verbunden, welche sich oftmals als Krystallisation offenbaren wird.

14. Nach unseren in den §§. 11 und 12 entwickelten Principien setzt die Anziehung die Reaction und diese wieder den Gegensatz zwischen den ursprünglichen Qualitäten der Elemente voraus.

Je größer nun der Gegensatz zwischen zwei Elementen, desto stärker natürlich auch die Reaction und die daher rührende Anziehung, desto stärker die Nothwendigkeit des Eindringens. Aber von dieser Nothwendigkeit giebt es geringere Grade, welche den geringeren Gegensätzen entsprechen. Wie mit dem Gegensatze die Nothwendigkeit des Eindringens, d. h. die Anziehung wächst, so nimmt sie auch mi ihm ab und wird 0 bei ganz gleichartigen Elementen. Auch bestätigt die Chemie in der That, daß die Intensität des Bestrebens, womit zwei ungleichartige Stoffe sich verbinden, um so größer ist, je größer der Gegensatz zwischen denselben ist.

In dem Gegensatze der Elemente liegt auch das, was man in der Chemie die Verwandtschaft der Stoffe zu nennen pflegt. Entgegengesetzte Elemente oder Stoffe sind verwandt, weil sie eben wegen ihres Gegensatzes in einander eingreifen und gegen einander reagiren, was bei völlig gleichartigen Elementen nicht möglich ist; diese verharren gleichgültig neben einander.

Ebenso wird die Anziehung null bei ganz verschiedenen Elementen, deren Qualitäten so beschaffen sind, daß sie kein eigentliches Verhältniß des Gegensatzes bilden. So findet z. B. zwischen einer Farbe und einem Ton kein Verhältniß des Gegensatzes, sondern bloße Verschiedenheit statt, wenn man nur auf die Empfindungen, als solche, reflectirt. Befinden sich daher Elemente, die hinsichtlich ihrer Qualitäten (beispielsweise) wie eine Farbe und ein Ton zu einander

Digitized by Google

stehen, an demselben Orte des Raumes, so sind sie dennoch für einander so gut als nicht vorhanden, indem sie ganz indifferent gegen einander sind. Es läßt sich denken, daß sich vermittelst solcher Elemente eine Wirkung durch einen Körper hindurch fortpflanzen kann, ohne daß seine Bestandtheile im Mindesten davon berührt werden.

Nach dem Grade des Gegensatzes unter den Elementen richtet sich also die Stärke der Anziehung und der Grad der hieraus entspringenden Verdichtung der Materie. Je geringer der Gegensatz, desto mehr nähert sich die Lage der Elemente der Unbestimmtheit, desto leichter wird sie sich abändern lassen.

15. Der Gegensatz zwischen den Elementen kann stärker oder schwächer sein. Mit diesem Unterschiede verknüpft sich noch ein anderer, eben so wichtiger, welcher darin besteht, daß der Gegensatz *gleich* oder *ungleich* sein kann.

Wir nennen den Gegensatz *gleich*, wenn gerade ein Element A genügt, um eins von anderer Art B zu dem höchsten Grade der Reaction zu veranlassen. Die Störung in der Qualität, welche einem von dem anderen droht, ist hier beiderseits gleich groß. Die Voraussetzung eines solchen Gegensatzes lag unseren bisherigen Betrachtungen über die starre Materie eigentlich zu Grunde. Kommen also nur *zwei* solche Elemente, welche einen gleichen Gegensatz bilden, zusammen, so werden sie sich vollständig durchdringen. Sobald aber ein zweites A (oder auch B) hinzukommt, entsteht nothwendig Repulsion, in Folge deren nur eine partiale Durchdringung zwischen ihnen stattfinden kann. Ein solches Verhältniß liegt aber in der Mitte unendlich vieler anderer. Bei Weitem öfter kann es daher sein, daß der Gegensatz *ungleich* ist. Ein solcher ist vorhanden, wenn mehrere Elemente der Art a ein einziges von der Art b durchdringen können, ehe ihnen von Seiten des b eine Repulsion entgegentritt. Können z. B. 3 Elemente von der Beschaffenheit des a eindringen in Ein Element von der Beschaffenheit des b, so wird auch die Reaction, welche ein einziges Element a in b hervorbringt, der Intensität nach nur $^1/_3$ betragen von derjenigen, welche alle drei a in b veranlassen. Die Reaction des b erlangt ihren größten Werth (ihr Maximum), sobald die 3 Elemente a zusammen eindringen. Die Reactionen dieser letzteren Elemente sind dann zusammen genommen gleichgeltend der *einen höchsten* Reaction des b. Kommt aber ein viertes a hinzu, so verhält es sich hier wie bei einem gleichen Gegensatze: es entsteht nothwendig Repulsion, vermöge deren die Elemente a bis zu einem bestimmten Grade aus b herausgetrieben werden. Doch kann zwi-

Digitized by Google

ſchen den Elementen a ſelbſt ſchon früher Repulſion eintreten, inſofern nämlich als ſie ſich nicht blos gegen b, ſondern auch gegen einander zu behaupten haben, falls ſie einander beim Eindringen in b begegnen. So können ſchon zwei Elemente a und a', wenn ſie mit b zuſammentreffen, in Conflict gerathen, um deſſen willen ſie nach entgegengeſetzten Richtungen aus b hervorragen müſſen. Noch größer wird natürlich die Repulſion, wenn noch ein drittes Element a in die Verbindung eingeht. Wie beim gleichen, ſo können ſich auch bei einem ungleichen Gegenſatze im Grunde nie mehr als zwei Elemente a und b vollſtändig durchdringen; ſobald ein zweites a hinzukommt, entſteht nothwendig Repulſion, welche nur eine theilweiſe Durchdringung geſtattet. Aber bei einem ungleichen Gegenſatze tritt eigentlich erſt dann Repulſion ein von Seiten des einen Elements, welches wir b genannt haben, wenn eine gewiſſe Anzahl anderer Elemente (a), die mehr als 2 betragen muß, überſchritten wird; während ſie ſich bei einem gleichen Gegenſatze zwiſchen den Elementen A und B ſogleich einſtellt, falls ein zweites A oder B hinzukommt.

Die Gleichheit oder Ungleichheit des Gegenſatzes bezieht ſich namentlich auf das Verhältniß, in welchem ſich die Elemente zu kleinſten Maſſentheilchen mit einander verbinden.

So kann der Gegenſatz und damit die Stärke der Anziehung zwiſchen den Elementen oder auch Stoffen a und b größer oder kleiner ſein als zwiſchen den Elementen oder Stoffen a und c, während die Beſchaffenheit dieſes Gegenſatzes hinſichtlich der Gleichheit oder Ungleichheit oder, was daſſelbe iſt, hinſichtlich des Verhältniſſes der Beſtandtheile in beiden Fällen dieſelbe iſt. So iſt z. B. eine beinahe gleiche Menge Sauerſtoff nöthig, um 100 Theile Eiſen in Eiſenoxydul zu verwandeln, als 100 Theile Natrium zum Alkali (Natron) zu machen, obgleich der Sauerſtoff eine viel größere Verwandtſchaft zum letzteren, als zum erſteren hat. Das heißt: die Stärke des Gegenſatzes iſt hier verſchieden, während der Grad der Ungleichheit beinahe einer und derſelbe iſt. Die Ungleichheit des Gegenſatzes beſteht aber hier eben darin, daß beinahe dreimal ſo viel Natrium als Sauerſtoff nöthig iſt, damit beide ſich zu Natron verbinden, und ebenſo beinahe dreimal ſo viel Eiſen als Sauerſtoff, damit ſich aus beiden Oxydul bilde.

Der Grad der Ungleichheit wird in der Chemie durch die Zahlen für die Verhältniſſe in den Verbindungen ausgedrückt, während ſie die Stärke des Gegenſatzes nur ungefähr erkennen, aber nicht eigentlich meſſen kann. Wäre das Letztere möglich, ſo ließe ſich der

Digitized by Google

Grad der Verdichtung der Stoffe a priori durch Rechnung bestimmen.

16. Die Elemente verbinden sich stets in bestimmten Verhältnissen zu kleinsten Massentheilchen mit einander, da ein beliebiges Element b nur eine begränzte Zahl anderer Elemente von der Art a in sich aufnehmen kann. Sind außer dieser Zahl noch mehr Elemente a vorhanden, so bleiben sie außer der Verbindung, weil sie wegen der allzustarken Repulsion, die mit der Anzahl der Elemente wächst, nicht eingelassen werden können. Es sei denn, daß neben den Elementen a auch noch mehrere Elemente b vorhanden wären, die sich mit ihnen zu neuen Massentheilchen verbinden könnten. Diese Massentheilchen stellen zusammen eine größere Masse dar, indem sie sich in unbestimmten Verhältnissen mit einander vereinigen. Daß diese kleinsten Körpertheilchen (Molekel) in der Regel eine genau bestimmte Figur haben müssen, ist bereits gezeigt worden.

So müssen z. B. 8 Elemente a, wenn sie aus einem ihnen entgegengesetzten b, als aus einem gemeinsamen Mittelpunkte, gleichmäßig hervorragen, einen Würfel um denselben bilden. Daher müssen wir uns die Molekel eines Körpers, dessen wahre Elemente sich in dem Verhältnisse von 1 : 8 mit einander verbunden haben, als Würfel denken. Je zwei solcher Würfel werden sich wieder mit einander verbinden, falls sie in hinreichende Berührung kommen. Denn jede Ecke, welche von den Elementen a gebildet wird, vergegenwärtigt das Element b, von dem die darin vorhandene Reaction herrührt; jede zieht an und wird angezogen, als ob b an ihrer Stelle wäre.

Wenn aber bei den Massentheilchen eines anderen Körpers sich die Elemente (c und d) der Zahl nach wie 1 : 6 verhalten, so würden aus der Mitte, welche c bilden mag, 6 Elemente theilweise hervorgedrängt. Dies auf den körperlichen Raum bezogen, führt zum Oktaëder. Doch könnte irgend eine Ursache auch eine flächenförmige Verbindung bestimmen, nämlich so, daß die 6 Elemente d genöthigt würden, in einer und derselben Ebene aus dem Element c zum Theil hervorzuragen. Dann würde ein regelmäßiges Sechseck von den Elementen d um c gebildet.

So kommt jeder Verbindung je nach dem Verhältnisse der entgegengesetzten Elemente, woraus sie gebildet wird, eine bestimmte Figur zu.

Abänderungen dieser Gestalten können und müssen vorkommen, da wohl selten die Krystallbildung nach allen Seiten hin frei ist, sondern stets von dem Einflusse der Umgebung abhängt, welcher schwer-

Digitized by Google

lich überall gleich sein kann. Man sieht leicht, daß sich hier ein unermeßliches Feld von Untersuchungen eröffnet. Erstlich für die Fälle, bei denen die Verhältnisse nicht auf die Bildung eines regelmäßigen Körpers hinweisen, wo dann verschiedene Annäherungen an die bequemste Lage der Elemente möglich sind. Zweitens für Verbindungen, deren Bestandtheile selbst schon aus ungleichartigen Elementen zusammengesetzt sind, so daß in Beziehung auf den einen oder anderen Bestandtheil solche oder andere Gestaltungen eintreten können.

Im Allgemeinen steht aber fest, daß alle Verbindungen, deren ungleichartige Elemente in demselben Verhältnisse zu einander stehen, dieselbe Gestalt annehmen müssen, falls die sonstigen Umstände gleich sind. Dies geht aus dem Früheren klar hervor. Besteht z. B. eine Verbindung M aus Einem Element von der Art b und 8 Elementen von der Art a, so müssen sie, wie wir wissen, einen Würfel bilden. Dieselbe Gestalt muß aber auch eine Verbindung N zeigen, welche aus den Elementen β und α in dem Verhältnisse 1 : 8 zusammengesetzt ist. Denn in dem einen, wie in dem anderen Falle werden 8 gleichartige Elemente aus einem entgegengesetzten zum Theil hervorgedrängt. Die Krystallgestalt ist daher dieselbe, mögen außerdem die Elemente beider Verbindungen noch so verschieden sein. Die Stärke des Gegensatzes und die daher rührende Anziehung, so wie alles Uebrige kann für beide Fälle verschieden sein, die Gruppirung der Elemente aber und die hiervon abhängenden Eigenschaften sind dieselben. Man nennt dies in der Chemie den Isomorphismus (ἴσος, gleich, μορφη, Gestalt). Wir werden gelegentlich noch einmal darauf zurückkommen.

17. Aus den bisher betrachteten kleinsten Massentheilchen müssen wir uns alle Körper zusammengesetzt denken, unter ihnen auch die Metalle, sowie überhaupt die meisten chemischen Grundstoffe. Die Massentheilchen ungleichartiger Stoffe vereinigen sich nun in bestimmten Verhältnissen zu neuen Theilchen, welche sich wieder in unbestimmter Menge zu einem Körper gruppiren können. Dies muß im Allgemeinen nach denselben Gesetzen geschehen, welche für die ursprünglichen Elemente gelten, wenn sie sich zu jenen kleinsten Körpertheilchen mit einander verbinden. Was aber die Gestalt der Theilchen (Molekel) des neu entstandenen Körpers betrifft, so hängt sie natürlich von den Formen der kleinsten Massentheilchen ab, welche den ungleichartigen Stoffen, aus denen er sich bildet, zugehören. Aus den Betrachtungen, welche wir darüber angestellt haben, geht

Digitized by Google

hervor, daß die Gestalt derselben meistens eine polyedrische sein wird.

Wenn sich zwei oder auch mehrere ungleichartige Stoffe zu einem neuen Körper vereinigen, so findet dem Bisherigen zufolge die Verbindung stets zwischen den kleinsten Massentheilchen derselben statt. Es kommt daher vor Allem darauf an, daß diese Theilchen in die innigste Berührung mit einander kommen. Deshalb pflegt man starre Körper zu pulverisiren und gehörig zu mischen; so wirken z. B. Kupfer und Schwefel in Massen nicht aufeinander, befinden sie sich dagegen in einem Zustande großer Zertheilung und werden sie dann in einem Mörser zusammengerieben, so entsteht alsbald aus ihnen ein neuer Körper, den man Schwefelkupfer nennt. Die innigere Berührung der kleinsten Theilchen wird auch dadurch herbeigeführt, daß man den einen oder anderen der beiden Körper, welche sich mit einander verbinden sollen, in einer Flüssigkeit auflöst. Hierdurch werden die Molecüle bloßgelegt und beweglicher gemacht. In Folge der Beweglichkeit erlangen sie die Fähigkeit, einer jeden Richtung zu folgen, was vorzugsweise zu einer innigen Berührung beiträgt. Erhöhung der Temperatur wirkt zum Theil auf ähnliche Weise, indem sie durch Schmelzung den Zusammenhang zwischen den Massentheilchen eines und desselben Körpers vermindert, die Beweglichkeit derselben erhöht, und so die unähnlichen Theilchen der beiden Körper zusammenbringt. Auf verschiedene Modificationen hinsichtlich der Verbindung verschiedener Stoffe, sowie auf den Einfluß der Temperatur werden wir in der Lehre von der Wärme zurückkommen.

Materien, welche aus je drei oder je vier ungleichartigen Stoffen bestehen, kann man bekanntlich in Gedanken zerlegen in mehrere Verbindungen aus zweien, zu welchen ein dritter gekommen sei und eine Abänderung hervorgebracht habe. Am natürlichsten wird man dann die Betrachtung bei derjenigen anheben, welche auf dem stärksten Gegensatze beruht, weil diese als die entschiedenste und dauerhafteste angesehen werden muß.

18. Wir haben schon bemerkt, daß sich die Molekel eines und desselben Körpers in unbestimmter Menge vereinigen können, während die Elemente, aus denen sich jene Massentheilchen gebildet haben, nur in begränzter Zahl eine Verbindung mit einander eingehen. Außerdem ziehen sich die Molekel eines Körpers aus demselben Grunde an, wie die Elemente, aus welchen sie selbst entstanden sind. Das Verhältniß, in dem sie sich mit einander verbinden, ist nur deshalb unbestimmt, weil keine bedeutende Repulsion mehr zwischen

Digitized by Google

ihnen zu erwarten ist. Obgleich die Molekel eines beliebigen Körpers gleichartige Ganze darstellen, so ist es doch immer noch der Gegensatz zwischen ihren Elementen, welcher sie mit einander verbindet und zusammenhält. Ein Anderes ist es mit den ungleichartigen Molekeln entgegengesetzter Stoffe. Diese vereinigen sich, wie die ursprünglichen Elemente, in bestimmten Verhältnissen zu neuen Massentheilchen, welche sich nun wieder gleich den oben angeführten verhalten. Dies Alles geht aus unseren früheren Betrachtungen klar hervor. Man hat der Anziehung, welche zwischen den Molekeln eines und desselben Körpers statfindet, einen besonderen Namen gegeben: man nennt sie Cohäsion. Dieselbe ist aber, wie wir wissen, eine unmittelbare Folge der Anziehung (Attraction) zwischen den eigentlichen Elementen selber.

Zu den Erscheinungen der Cohäsion gehört z. B., daß zwei Bleiplatten, die man zusammendrückt, beinahe so fest an einander haften, als ob sie nur eine einzige ausmachten, vorausgesetzt, daß die Flächen, in denen sie sich berühren, gehörig eben und metallisch sind. Dasselbe ereignet sich häufig zwischen zwei polirten Spiegelplatten, wenn sie dicht aufeinander gelegt werden.

Auf dieselbe Weise zeigt sich eine Anziehung verschiedenartiger Körper, wenn sie in hinreichende Berührung mit einander gebracht werden. In diesem Falle nennt man sie jedoch Adhäsion. Hierher gehört die Wirkung des Leims, Wachses, Mörtels und anderer Bindemittel, indem sie Körper an einander festhalten. Kittet man z. B. mittelst Siegellack zwei Glasstücke zusammen, so kommt es zuweilen vor, daß beim Auseinanderreißen Theile aus dem Glase herausgerissen werden, ohne daß sich das Siegellack von dem Glase trennt. In diesem Beispiele ist also die Adhäsion zwischen Glas und Siegellack stärker, als die Cohäsion zwischen den Theilchen des Glases selbst. Das Gleiche findet mitunter statt, wenn man eingetrockneten Leim von einer Glasfläche zu trennen sucht. Die Eigenschaft des Wassers, an starren Körpern zu haften und diese zu benetzen, ist ebenfalls eine Wirkung der Adhäsion.

Da sich die Adhäsion eigentlich zwischen den ungleichartigen Molekeln verschiedener Körper zeigt, so ist sie als ein Anfang chemischer Einwirkung zu betrachten. Zu den Erscheinungen derselben kann man noch rechnen, daß die Theilchen aller Körper sich als Staub an senkrechte Wände oder unter den Decken der Zimmer anhängen, ohne vermöge ihres Gewichtes herabzufallen. Dieses Anhängen ist um so

Digitized by Google

stärker, je kleiner die Theilchen sind, weshalb der feinste Staub sich am dichsten und stärksten anlegt.

Andere Erscheinungen der Adhäsion, wie das Aufsteigen von Flüssigkeiten in engen Röhren (Haarröhrchen), werden wir später besprechen. — Zwischen Wasser und verschiedenen Salzen besteht ebenfalls eine Anziehung, in Folge deren die letzteren in ersteren aufgelöst werden. So kann sich z. B. eine gewisse Menge Kochsalz in einer beliebig großen Menge Wasser auflösen, und umgekehrt können z. B. 100 Theile Wasser jede beliebige Menge Salz, die weniger als 37 Theile beträgt, mit sich verbinden. Ebenso hat das Wasser eine bestimmte Auflösungsfähigkeit für jedes andere lösliche Salz. Diejenige Quantität des Salzes, von welcher das Wasser gesättigt wird, wo es also außer Stande ist, noch mehr davon aufzulösen, hängt von der Temperatur ab. Im Allgemeinen steht es fest, daß sich Salze, deren Cohäsion durch die Wärme leicht überwunden werden kann, die also leicht schmelzbar sind, in größter Menge auflösen.

Da zwischen den Theilchen eines flüssigen Körpers keine bedeutende Cohäsion statt hat, so ist bei einem solchen die Auflöslichkeit im Allgemeinen unbeschränkt. So löst sich Alkohol in Wasser in jedem Verhältnisse auf.

Die Auflösung von Salzen in Wasser u. dglch. ist also in so fern verschieden von der eigentlich chemischen Anziehung, als keine Verbindung in bestimmten Verhältnissen dabei vorkommt. In dieser Beziehung gleicht sie also der Cohäsion. Nun wissen wir aber, daß die Stärke, mit welcher sich zwei Stoffe chemisch verbinden, um so bedeutender ist, je entgegengesetzter sie hinsichtlich ihrer Eigenschaften sind, während sich erfahrungsmäßig Körper um so leichter in einander auflösen, je ähnlicher ihre Eigenschaften sind. So verbinden sich Metalle chemisch mit nichtmetallischen Stoffen, Säuren mit Alkalien. Will man aber ein Metall auflösen, so nimmt man wieder ein Metall, z. B. Queckſilber. Desgleichen lösen sich sauerstoffhaltige Körper am leichtesten in sauerstoffhaltigen Auflösungsmitteln, z. B. Salze und Säuren in Wasser, während Flüssigkeiten, welche sehr viel Wasserstoff enthalten, wie Alkohol und Aether, die besten Auflösungsmittel für wasserstoffreiche Körper, z. B. für Oele, Fette, Harze sind. Die Anziehung, welche Auflösung zur Folge hat, findet also nicht sowohl an den sehr ungleichartigen als vielmehr an den ähnlichen kleinsten Theilchen statt. In diesem Umstande liegt auch vorzugsweise der Grund, warum die Verbindung in einem unbestimmten

Digitized by Google

Verhältnisse geschieht, sowie bei der Cohäsion, welche die kleinsten Massentheilchen eines und desselben Körpers an einander bindet.

19. Zu Ende des §. 12 fanden wir, daß die Verdichtung der Elemente zur Materie auf einem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion beruhe, oder, was dasselbe ist, daß der äußere Zustand, die Lage der Elemente sich richte nach dem inneren, d. h. nach den Reactionen jedes Elementes gegen die, mit welchen es zusammen ist.

Soll nun eine körperliche Masse getrennt werden, so muß entweder der äußere Zustand gehindert werden, sich nach dem inneren ferner zu richten, oder die inneren Zustände müssen verändert werden, so daß sie jetzt auch andere äußere Zustände erfordern.

Im ersten Falle kann man den Grund der Trennung *mechanisch*, im zweiten *chemisch* nennen.

Von welcher Art nun auch der mechanische Grund der Trennung sein mag, so setzt ihm die Nothwendigkeit, daß sich der äußere Zustand richte nach dem bisher vorhandenen inneren, einen Widerstand entgegen, welcher dem Zuschauer als eine widerstehende Kraft erscheinen wird. Dieser Widerstand wächst, wenn die Verdichtung der zum Theil in einander eingedrungenen Elemente vermindert wird. Denn die Nothwendigkeit, daß die Elemente so tief in einander seien, als es ihrem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion entspricht, wird um so größer, je weiter sie davon abweichen. Je weiter also die Elemente von einander entfernt werden, desto größer wird auch in Folge ihrer gegenseitigen Reactionen die Nothwendigkeit, wieder so tief in einander einzudringen, als es jenem Gleichgewichte gemäß ist, so daß hier die geringste Durchdringung mit der stärksten Attraction verbunden ist.

Kann nun der Grund der Trennung diese stärkste Anziehung überwinden, so zerreißt die Masse *plötzlich*, nachdem sie einen *allmälig wachsenden* Widerstand geleistet hat. Denn auf den geringsten Grad der Durchdringung folgt mit einem Male das Außereinander der Elemente. In diesem aber, wenn nicht irgend etwas Vermittelndes vorhanden ist, hört alle Wechselwirkung der Elemente auf. Indem die Trennung der Theile so weit geht, daß ihre Durchdringung ganz aufgehoben wird, bricht der Körper und kann sich nicht wieder herstellen.

Hätte die Cohäsion der Masse ihren Grund in *besonderen* anziehenden Kräften, so müßten dieselben einen allmälig abnehmenden Widerstand dem Versuche der Trennung entgegensetzen. Denn jene Kräfte sind ja Functionen des Abstandes der Elemente von einander,

Digitized by Google

d. h. sie müssen mit wachsender Entfernung abnehmen. Die Erfahrung zeigt aber das Gegentheil. Versucht man einen Körper zu zerreißen, so geben anfänglich seine Theile etwas nach, dann leisten sie, wie wir oben gefunden haben, einen allmälig wachsenden Widerstand, welcher ein Maximum erreicht, worauf der Körper plötzlich zerreißt, falls die trennende Gewalt noch fortwirkt.

Kann hingegen der Grund der Trennung die stärkste und letzte Attraction nicht überwinden, und hört er alsdann auf, zu wirken: so kehren die Molekel, welche sich eine gewisse Dehnung hatten gefallen lassen, in ihre vorige Lage von selbst zurück, indem sie dabei nur dem inwohnenden Gesetze ihrer Dichtigkeit folgen.

Aehnliches gilt von der Zusammendrückung.

Werden nämlich die Elemente durch einen äußeren Druck tiefer in einander gedrängt, als es ihrem Gleichgewicht der Attraction und Repulsion gemäß ist, so wird die Repulsion zwischen ihnen verstärkt. Hierdurch entsteht nothwendiger Weise das Streben, in ihre vorige Lage zurückzukehren, und zwar um so mehr, je weiter sie davon abgewichen sind.

Da die Verdichtung der Elemente zur Materie auf einem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion beruht, so kann dieses, insofern es aus den ursprünglichen Qualitäten der Elemente hervorgeht, für jede Art von Materie nur ein einziges bestimmtes sein. Dieses Gleichgewicht kann, wie jedes andere, durch hinzukommende Ursachen gestört werden. Aber sobald die Materie in Freiheit ist, kehren die Elemente oder Molekel in ihre bestimmte Lage zurück. Daher ist alle Materie nothwendig elastisch, mag auch die Elasticität bei manchen Arten so gering sein, daß sie kaum in unsere Wahrnehmung fallen kann.

Was aber die Materie vertheidigt, wenn sie sich undurchdringlich zeigt, liegt nach dem Bisherigen klar am Tage. Nichts Anderes als die Lage der Elemente, wie dieselbe zu deren inneren Zuständen paßt. Dem Stoße, dem Drucke, wodurch die Theile zunächst der Oberfläche gegen das Innere getrieben werden, giebt sie Anfangs nach, aber als elastisch stellt sich die gehörige Lage wieder her. Denn die Reactionen, gemäß den ursprünglichen Qualitäten der Elemente, fordern die ihnen gebührende Verdichtung, d. h. die räumliche Lage der Elemente zurück.

Die Undurchdringlichkeit der Körper ist hiernach blos in einem relativen Sinne zu verstehen. Nämlich diejenigen Massen sind für einander undurchdringlich, welche, wenn sie eindringen sollten, die

Digitized by Google

vorhandenen inneren Zustände abändern müßten, und zwar so, daß dabei schwächere Anziehungen an die Stelle der stärkeren kämen, was unmöglich ist. Man habe zwei Massen, von denen die eine aus den Elementen A und B, die andere aus den Elementen C und D gebildet sein mag. Auch seien C und D oder wenigstens eines von ihnen solche Elemente, die zu A und B in einem Gegensatze oder, was dasselbe ist, in einem Verhältnisse chemischer Verwandtschaft stehen. Alsdann müßten die beiden Massen AB und CD, wenn sie in einander eindrängen, neue innere Zustände ihrer Elemente ergeben. Dies kann aber nur dann geschehen, wenn die schon vorhandenen inneren Zustände, falls sie sich mit jenen nicht vertragen, eine Abänderung erlitten haben. Ist nun eine solche Abänderung aus irgend einem Grunde nicht möglich, so können auch die Massen nicht in einander eindringen. Ist z. B. die Anziehung zwischen A und B stärker, als die zwischen A und C oder D, so behauptet sich jede von diesen Massen nach dem Obigen in ihrer Constitution, eine eigentliche Durchdringung kann nicht stattfinden, wie sie auch einander drücken mögen; es müßten denn beide eine chemische Verbindung mit einander eingehen können.

Dagegen ist die Materie durchdringlich, wenigstens theilweise, für solche Elemente, welche ihren inneren Zustand überwinden können. In diesem Falle findet dasjenige statt, was man chemische Auflösung nennt. Zugleich bildet sich eine neue Art von Materie, indem der neuen Verbindung auch eine eigenthümliche Verdichtung entsprechen wird.

Kommt zu den verbundenen Elementen oder Stoffen A und B ein drittes C, welches dem A mehr als B, oder dem B mehr als A entgegengesetzt ist; so verbinden sich die beiden, deren Gegensatz, folglich auch deren Anziehung am stärksten ist. Das übrigbleibende aber muß aus seiner früheren Verbindung ausscheiden, sobald der innere Zustand, den es vorher in seinem verbundenen hervorbrachte, nunmehr durch C gehemmt wird. Dies gilt im Grunde allgemein, obschon dabei (wegen des Einflusses der Umgebung und anderer Umstände) mancherlei Modificationen vorkommen können.

20. Man wird bemerkt haben, daß sich die inneren und äußeren Zustände der Elemente eigentlich gegenseitig bestimmen. Erst müssen die Elemente zusammen kommen, wenn sie aufeinander einwirken sollen. Aus dieser Wechselwirkung geht dann der äußere Zustand, die Lage oder Gruppirung der Elemente als nothwendige Folge hervor. Attraction und Repulsion, welche von dem Gegensatze unter den

Digitized by Google

Elementen abhängen, bestimmen den Grad der Durchdringung. Und umgekehrt, wenn wir uns die Elemente als Kügelchen denken, läßt sich die Stärke der Attraction und Repulsion durch den Grad der partialen Durchdringung oder durch den Unterschied der durchdrungenen und nicht durchdrungenen Theile der Kügelchen ausdrücken. Man sieht leicht, daß sich hier der Geometrie und Rechnung ein weites Feld eröffnet. —

Man nehme nun noch einmal zwei entgegengesetzte Elemente a und b an, die sich nur theilweise durchdrungen haben und aus irgend einem Grunde in dieser Lage beharren. Wir wissen, daß sich die nicht durchdrungenen Theile doch genau in demselben Zustande der Reaction befinden, als die in einander eingedrungenen. Wenn daher ein zweites a, das durch a′ bezeichnet sei, eindringt in diejenigen Theile des ersten a, welche von b nicht durchdrungen sind; so trifft es daselbst zwar nicht wirklich das Element b, aber doch den Gegensatz desselben gegen a. Deshalb muß es auch dawider reagiren und demgemäß tiefer in das erste a eindringen, sofern sich nicht eine Repulsion entgegenstellt. Dies geht so in's Unbestimmte fort, wie die Figur zeigt.

So wie a und b unvollkommen zusammen sind, und wie sich a und a′ in einer solchen Lage befinden, eben so sei a″ in a′, a‴ in a″, a⁗ in a‴, u. s. f., so weit man will, theilweise eingedrungen. Wenn kein Grund der Repulsion eintritt, muß jedes Element tiefer in das nächst vorhergehende eindringen. Hier scheint nun b in die Ferne zu wirken, indem sich seine scheinbare Anziehungskraft mittelbar bis zum äußersten a erstreckt. Doch würde sie sogleich verschwinden, wenn die Vermittelung aufhörte, also eine Lücke in der Reihe (vielleicht durch Eintritt eines fremdartigen Elements) entstünde.

Auf diese Weise können also die Folgen des Gegensatzes eine Erweiterung erhalten, vermöge deren ein Element wirksam wird an einem Orte, wo es nicht gegenwärtig ist.

Auch muß es für diese Wirkung in die Ferne ein Gesetz geben, nach welchem sie mit zunehmender Entfernung abnimmt.

Denn sobald die Durchdringung des ersten a mit b nur unvollkommen ist, kann auch die Reaction und damit die Anziehung in jedem von ihnen dem Grade nach nur der partialen Durchdringung entsprechen, von welcher, als ihrer Bedingung, sie abhängt. Mithin ist für das folgende a′ nicht das ganze b mittelbar gegenwärtig,

Digitized by Google

weshalb seine Reaction und Anziehung wieder bei demjenigen Grade stehen bleiben muß, welcher seinem partialen Eindringen in a gemäß ist. Noch geringer wird also die Reaction und das Eindringen für a'' und wieder kleiner für a''' u. s. w. sein.

Ob aber nun die Wirkung mit der einfachen Entfernung oder mit dem Quadrate oder gar einer noch höheren Potenz derselben abnimmt, ist eine Frage, die sich nur unter besonderen Voraussetzungen beantworten läßt. Aus unseren Principien folgt aber nothwendig, daß sie mit zunehmender Entfernung abnehmen muß.

So finden wir nach unseren Lehren eine Wirkung in die Ferne begreiflich, ohne den Atomen besondere Kräfte beilegen zu müssen, vermöge deren sie unmittelbar auf einander wirken. Im Grunde ist die Lehre von der Wirkung in die Ferne, auch da, wo sie sich zwischen großen Massen zeigt, welche weit aus einander liegen, nur eine Erweiterung der chemischen Grundlehren, wie wir dies später noch deutlicher sehen werden.

Digitized by Google

Zweiter Abschnitt.

Vom Gleichgewicht fester Körper.

Erstes Kapitel.

Zusammensetzung und Zerlegung sogenannter Kräfte.

21. In der Mechanik heißt jede Ursache, welche Bewegung hervorbringt oder doch hervorzubringen strebt, **Kraft**. Von besonderen, für sich bestehenden Kräften kann zufolge des vorhergehenden Abschnitts freilich keine Rede sein. Es ist aber in der Naturlehre und namentlich in der Mechanik von Wichtigkeit, die bewegenden Ursachen ohne Rücksicht auf ihre besondere Beschaffenheit mit einander vergleichen und messen zu können. Zu diesem Zwecke ist eine Einheit nöthig.

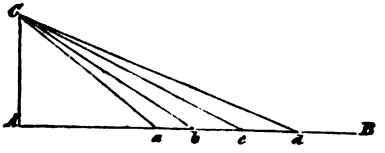
Wenn nun zwei Kräfte, die auf denselben Punkt nach gerade entgegengesetzten Richtungen wirken, sich gegenseitig aufheben oder, was dasselbe ist, im Gleichgewicht halten, so betrachtet man sie als **gleich** groß. Hieraus zieht man weiter die natürliche Folge, daß zwei, drei gleiche Kräfte in **derselben** Richtung auf denselben Punkt wirkend eine zwei-, dreimal so große Kraft ergeben u. s. f. Man erkennt, daß auf diese Weise die bewegenden Ursachen, so unbekannt sie auch sonst hinsichtlich ihrer Beschaffenheit sein mögen, doch meßbar sind und durch Zahlen ausgedrückt werden können.

Wirken mehrere Kräfte nach derselben Richtung auf einen Punkt, so kann man ihre Gesammtwirkung einer einzigen Kraft zuschreiben, welche der Summe aller einzelnen gleich ist. Falls aber zwei ungleiche Kräfte nach gerade entgegengesetzten Richtungen auf einen Punkt wirken, so läßt sich die Gesammtwirkung einer Kraft beilegen, welche dem Unterschiede jener Kräfte gleich ist und im Sinne der größeren wirkt. Ebenso bei mehreren.

Digitized by Google

Wenn die Richtungen zweier Kräfte, welche auf einen Punkt wirken, einen Winkel mit einander einschließen, so sieht man wohl, daß das eben zuvor Gesagte nicht stattfinden kann. Die eine Kraft, welche ihnen hinsichtlich der Wirkung gleichgeltend ist, kann weder ihrer Summe, noch ihrer Differenz gleich sein. Das erste setzt voraus, daß beide Kräfte in demselben Sinne, das andere aber, daß sie in gerade entgegengesetzten Richtungen auf den Punkt wirken. Diese Kraft muß eine mittlere Richtung haben, welche aus den Richtungen der beiden gegebenen Kräfte auf bestimmte Weise zusammengesetzt ist.

Man denke sich zwei unter einem Winkel zusammenstoßende Linien AB und AC und verbinde den Punkt C mit verschiedenen Punkten a, b, c, d... der Linie AB.



Verfolgt man nun die Richtungen der Linien aC, bC, cC... nach C hin, so können sie einander nicht früher, noch später treffen, als eben in C. Ihre Ordnung und Folge hängt ab von der Folge und Fortschreitung der Punkte a, b, c, ... auf AB. Um den Punkt C zu erreichen, müssen sie alle, wie die Linie AC, aufwärts gehen. Dieses Aufwärts gilt für die Lage des Punktes C gegen alle Punkte der Linie AB. Man erkennt, daß die Richtungen genannter Linien aus den gegebenen Richtungen der Linien AB und AC gemischt sind. Da nun aber die Richtung für jede Gerade (von einem Punkt nach einem bestimmten anderen hin gerechnet) nur eine einzige ist und sein kann, so gehen die Linien aC, bC, cC, ... schon in ihrem Anfange bei a, b, c, ... zugleich aufwärts und links. Das Links ist durch die Richtung der Linie AB von a, b, c, ... nach A hin dargestellt.

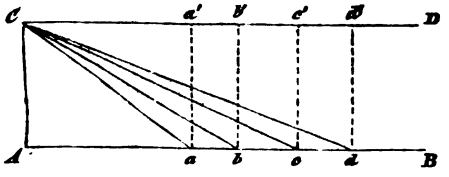
Ferner sieht man, daß je zwei nächste Linien aC, bC, ..., nur eine bilden würden, wenn ihre Anfangspunkte a, b, ... zusammenfielen. Der Unterschied dieser Punkte beruht aber blos auf ihrer größeren oder geringeren Entfernung von A. Auch soll AC immer dieselbe Linie sein, während jede der Linien aC, bC, ... verschieden wird, je nachdem die Punkte a, b,.... näher bei A oder ferner davon liegen. Gerade von diesem Unterschiede nun hängt die Richtung jeder der Linien aC, bC, ... ab. In die Mischung von Richtungen, welche nöthig ist, um die Richtungen der Linien aC, bC, ... zu bestimmen, geht stets gleichviel ein von der Richtung AC (sofern AC eine unveränderliche Linie ist), aber stets mehr von

Digitized by Google

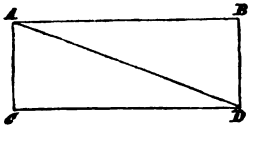
der Richtung AB, je weiter sich a, b, ... von A entfernen. Demnach besteht ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen den Richtungen und Größen der Linien.

Zwar sind die Richtungen sämmtlicher Geraden aC, bC, cC, ... aus den Richtungen der Linien AC und AB gemischt; soll aber eine Richtung gefunden werden, welche den Richtungen zweier der Größe nach gegebenen Linien AC und dA gerade entspricht, so wird sie (dem erwähnten Zusammenhange gemäß) immer durch die Linie dC dargestellt, welche den Punkt d mit C verbindet. Es ist also mit der Richtung zugleich die Größe bestimmt.

Was von AB und AC, das gilt natürlich auch von AC und der mit AB parallelen CD in Beziehung auf die mittleren Linien wie Ca, Cb, ... Denn parallele Linien sind eben solche, welche hinsichtlich der Richtung genau übereinstimmen und sich also nur durch ihre allenthalben gleiche Entfernung von einander unterscheiden. Nur muß man jetzt die Richtungen der Linien Ca, Cb, ... von C aus verfolgen. Man sieht, daß sie von ihrem Anfangspunkte C aus zugleich abwärts, wie die Linie CA, und rechtshin, wie die Linie CD, gehen; daß sie ferner um so mehr die Richtung der Linie CD einschlagen, je weiter sich ihre Endpunkte a, b, c, ... von A entfernen, oder je größer die der Richtung (CD) nach gegebenen und mit Aa, Ab, Ac, ... parallelen Linien Ca', Cb', Cc', ... genommen werden.



Hat man also zwei der Richtung und Größe nach gegebene Linien AB und AC, so stellt die Diagonale AD des Parallelogramms ABDC die Richtung vor, welche den Richtungen der Linien AB und AC genau entspricht.



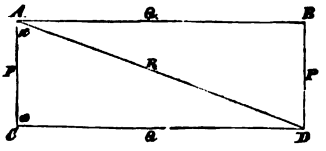
Haben aber die Linien AB und AC gleiche Länge, so muß zufolge der früheren Betrachtungen die aus ihren Richtungen gemischte Richtung der Mittellinie AD die Richtung einer jeden der Linien AB und AC in gleichem Maße enthalten, so daß von der Linie AD der Winkel, welchen die gegebenen Linien mit einander einschließen, halbirt wird.

Von dem Bisherigen läßt sich nun leicht die Anwendung machen auf zwei Kräfte, die unter irgend einem Winkel auf einen Punkt wirken. Stellt man die Größen dieser Kräfte durch die Längen der

Digitized by Google

Linien AB und AC dar, so ergiebt die Diagonale des Parallelogramms, welches sich aus den angeführten Linien bilden läßt, die Richtung der einen Kraft, die hinsichtlich der Wirkung den beiden gegebenen gleichgeltend ist. Die Größe dieser Kraft ist aber zugleich mit ihrer Richtung gegeben. Der kurz zuvor ausgesprochene Satz ist bekannt unter dem Namen des Parallelogramms der Kräfte. In der Lehre von der Bewegung werden wir noch einmal darauf zurückkommen.

22. Seien nun P und Q die Werthe der beiden Seitenkräfte AB und AC, und α der Winkel, den ihre Richtungen mit einander machen. Die Mittelkraft AD sei durch R bezeichnet. Dann ist zufolge einfacher trigonometrischer Lehren



$$R^2 = P^2 + Q^2 + 2\,PQ\,\cos\alpha,$$

aus welcher Gleichung der Werth von R bestimmt werden kann, sobald P, Q und α gegeben sind.

Schließen die beiden Seitenkräfte einen rechten Winkel mit einander ein, so ist $\cos 90^\circ = 0$ und mithin

$$R^2 = P^2 + Q^2,$$

was sich nach dem Pythagoriſchen Lehrſatze auch ohne Weiteres aus der Figur ergiebt.

Um den Winkel x zu finden, welchen die Mittelkraft R mit der Seitenkraft P macht, hat man die Proportion:

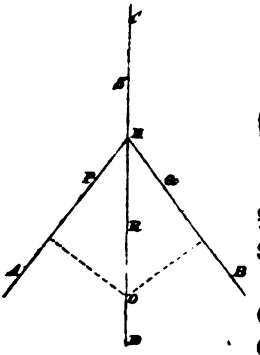
$$\sin x : \sin\alpha = Q : R.$$

Wie sich nun zwei gegebene Kräfte in eine einzige zusammensetzen lassen, so kann man auch wieder eine Kraft in zwei andere zerlegen. Aus dem Vorstehenden erkennt man aber, daß alle Fragen hinsichtlich der Zusammensetzung und Zerlegung der Kräfte auf die Auflösung eines Dreiecks zurückkommen, welches von der Mittelkraft und den beiden Seitenkräften gebildet wird.

Man habe drei Kräfte P, Q, S, die auf den Punkt M nach den Richtungen MA, MB, MC wirken. Halten sie nun einander das Gleichgewicht, so sieht man, daß jede dieser Kräfte der Mittelkraft der beiden anderen gleich und entgegengesetzt sein muß. Ist MD die Verlängerung von MC, so wird die Mittelkraft von P und Q nach MD gerichtet sein. Bezeichnet man sie durch R, so hat man also R = S.

Durch Vergleichung der Mittelkraft R mit jeder der Seitenkräfte P und Q ergeben sich aber (Obigem zufolge) die Proportionen:

Digitized by Google



$$R : Q = \sin AMB : \sin AMD$$
$$R : P = \sin AMB : \sin BMD \quad (1)$$

Da nun $AMD = 180° - AMC$
und $BMD = 180° - BMC$,
so ist auch $\sin AMD = \sin AMC$
und $\sin BMD = \sin BMC$.

Dies berücksichtigt, erhält man aus obigen Proportionen:

$$S : Q : P = \sin AMB : \sin AMC : \sin BMC.$$

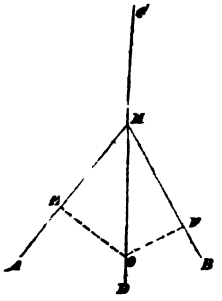
Wenn also die Kräfte am Punkte M im Gleichgewichte sind, so ist jede derselben dem Sinus des Winkels proportional, welchen die Richtungen der zwei anderen einschließen.

Aus den Proportionen (1) folgt ferner:

$$P : Q = \sin BMD : \sin AMD.$$

Man ziehe nun von irgend einem Punkte O, welcher in der Richtung der Mittelkraft R liegt, die senkrechten Linien OE und OF auf die Richtungen der Seitenkräfte P und Q. Dann entstehen die rechtwinkligen Dreiecke MEO und MFO, in denen ist:

$$\frac{OE}{MO} = \sin AMD, \quad \frac{OF}{MO} = \sin BMD.$$



Setzt man diese Werthe in die angeführte Proportion, so ist

$$P : Q = OF : OE.$$

Das heißt: die Seitenkräfte verhalten sich umgekehrt wie die senkrechten Linien, die auf ihre Richtungen von irgend einem Punkte in der Richtung der Mittelkraft gezogen sind. Und rückwärts ist leicht einzusehen, daß der Punkt O der Richtung der Mittelkraft angehört, wenn sich die Seitenkräfte verkehrt wie die senkrechten Linien OE und OF verhalten. —

Wie wir die Resultirende (Mittelkraft) zweier Kräfte gefunden haben, so kann man auch leicht die einer beliebigen Anzahl von Kräften finden, wenn sie auf denselben Punkt wirken. Uebrigens mögen sie in derselben Ebene oder in verschiedenen Ebenen liegen. Man bildet nämlich zuerst die Resultirende zweier Kräfte, setzt dieselbe mit der dritten Kraft zusammen und verbindet die hieraus hervorgehende Resultirende wieder mit der vierten Kraft, u. s. f.

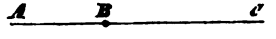
Durch das umgekehrte Verfahren kann man auch jede Kraft in

Digitized by Google

eine beliebige Anzahl von Kräften zerlegen, die ihr hinsichtlich der Wirkung gleichgeltend sind.

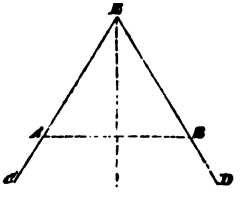
Aus unseren früheren Betrachtungen geht aber hervor, daß die Zerlegung der Kräfte auf eine Zerlegung der Richtungen zurückkommt, nach welchen sie wirken.

23. Der Angriffspunkt A einer Kraft P läßt sich unbeschadet ihrer Wirkung nach einem anderen Punkt B hin versetzen, der in der Richtung der Kraft liegt und mit ihm (A) unveränderlich verbunden ist. Denn man nehme an, daß die Kraft P nach der Richtung A C wirke.



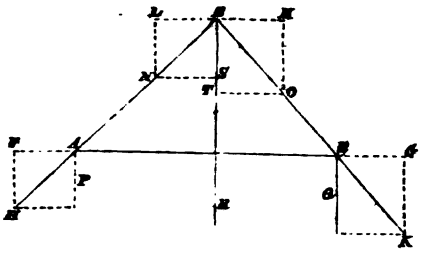
Denkt man sich nun in B zwei gleiche Kräfte angebracht, die nach entgegengesetzten Richtungen wirken, und zwar die erste P′ nach der Richtung BC, die zweite P″ aber nach der Richtung B A, so ändert dies nichts in der Wirkung der Kraft P. Setzt man aber voraus, daß die Kräfte P′ und P″ der Kraft P gleich sind, so heben sich P und P″ auf, weil sie im entgegengesetzten Sinne wirken, während die Kraft P′ übrig bleibt. Die Kraft P ist also durch eine ihr gleiche P′ ersetzt, welche am Punkte B nach der Richtung B C wirkt.

24. Bisher haben wir angenommen, daß der Angriffspunkt der Kräfte für alle derselbe sei. Wir wollen nun den Fall betrachten, wo zwei Kräfte verschiedene Angriffspunkte haben, welche jedoch auf irgend eine unveränderliche Weise mit einander verbunden sind. Seien A und B die Angriffspunkte der nach den Richtungen A C und B D wirkenden Kräfte P und Q. Verlängert man A C und B D, so werden sie sich in einem Punkte E schneiden, der sich nach den vorhergehenden §§. als gemeinschaftlicher Angriffspunkt der beiden Kräfte P und Q betrachten läßt. Die Mittelkraft derselben ergiebt sich aber leicht mittelst des Parallelogramms der Kräfte, indem wieder die Bestimmungen des §. 22 eintreten.



Wir wollen jetzt annehmen, daß die Kräfte P und Q nach parallelen Richtungen und in demselben Sinn auf die Punkte A und B wirken, welche durch die gerade Linie A B unveränderlich mit einander verbunden sein mögen. Bringt man an die Endpunkte der Linie A B gleiche Kräfte an, welche im entgegengesetzten Sinne nach den Verlängerungen dieser Linie gerichtet sind, so sieht man wohl, daß dadurch in den Wirkungen der beiden Kräfte P und Q nichts geändert

Digitized by Google



wird. Seien diese gleichen Kräfte durch AF und BG dargestellt. Man bilde nach dem Parallelogramm der Kräfte aus P und AF, so wie aus Q und BG die Resultirenden AH und BK. Verlängert man letztere bis zu ihrem Durchschnittspunkte E, so läßt sich derselbe wieder als gemeinschaftlicher Angriffspunkt der Kräfte EN und EO, welche resp. AH und BK gleich sind, betrachten, wenn man ihn unveränderlich mit den Punkten A und B verbunden denkt. Durch den Punkt E ziehe man die geraden Linien LM und ER resp. parallel mit AB und den Richtungen der Kräfte P und Q. Dann lassen sich die Kräfte EN und EO nach diesen Parallelen zerlegen, wie es in der Figur geschehen ist. Offenbar sind aber LE und ME gleich FA und GB, sowie LN und MO resp. gleich P und Q. Da LE und ME gleiche und entgegengesetzte Kräfte sind, so heben sie sich auf, während ES und ET übrig bleiben. Die Resultirende der beiden parallelen Kräfte ist also $= ES + ET = P + Q$, d. h. gleich deren Summe, und ihnen wieder parallel.

Wegen der ähnlichen Dreiecke AFH, AER und BGK, BER bestehen die Proportionen:

$$AF : FH = AR : RE$$
$$BG : GK = BR : RE,$$

woraus folgt

$$FH : GK = BR : AR, \text{ oder}$$
$$P : Q = BR : AR.$$

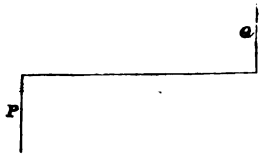
D. h. die Kräfte P und Q verhalten sich umgekehrt wie ihre Entfernungen vom Punkte R, in welchem die Richtung der Mittelkraft die Verbindungslinie der Angriffspunkte A und B schneidet.

Der Punkt R heißt Mittelpunkt der parallelen Kräfte. Seine Lage ist, wie leicht zu ersehen, unabhängig von dem Winkel, welchen die Richtungen der parallelen Kräfte mit der Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte machen. Auch bleibt seine Lage dieselbe, wenn sich die Kräfte P und Q wie immer um ihre Angriffspunkte drehen, sofern sie nur einander parallel bleiben. Wirken P und Q nach parallelen, aber entgegengesetzten Richtungen, so ist die Mittelkraft ihrem Unterschiede gleich und wirkt im Sinne der größeren. Man hat also $R = Q - P$, falls $Q > P$. Dies läßt sich durch eine der vorigen ähnliche Construction leicht darthun.

Digitized by Google

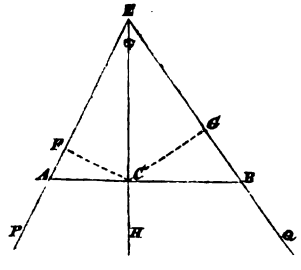
Bei parallelen Kräften bestimmt sich also die Resultirende durch eine Addition oder Subtraction, gerade wie bei Kräften, die in demselben oder entgegengesetzten Sinne auf einen Punkt wirken.

Ist in dem Falle, wo die Kräfte nach parallelen, aber entgegengesetzten Richtungen wirken, P = Q, so hat man R = 0, d. h. es giebt keine Resultirende. Auch ist kein Grund vorhanden, warum die Resultirende eher nach der einen, als nach der entgegengesetzten Richtung wirken sollte.



Nach den angestellten Betrachtungen ist es nun leicht, die Resultirende einer beliebigen Anzahl paralleler Kräfte zu bestimmen, die theils in demselben, theils im entgegengesetzten Sinne wirken, wenn nur die Punkte, an welchen sie angebracht sind, unveränderlich mit einander verbunden sind. Man bildet nämlich zuerst aus zwei Kräften eine Resultirende, setzt diese mit der dritten Kraft zusammen u. s. f. Die Resultirende aller gegebenen Kräfte ist gleich der Summe derjenigen, die in einem Sinne wirken, weniger der Summe derjenigen, die in entgegengesetztem Sinne wirken. Nennt man die erste Summe Q, die zweite P, so ist die Resultirende R = Q − P, wenn Q > P. Ihre Wirkung geschieht natürlich im Sinne der größeren Summe Q, während ihre Richtung der gemeinschaftlichen Richtung aller Seitenkräfte parallel ist.

25. Denkt man sich die Angriffspunkte der Kräfte P und Q, die nach den in der Figur angegebenen Richtungen wirken, durch eine feste, unbiegsame Linie AB, welche um einen ihrer Punkte C drehbar ist, unveränderlich mit einander verbunden, so hat man einen Hebel.



Der Durchschnittspunkt der Linien AE und BE ist wieder der gemeinschaftliche Angriffspunkt der Kräfte P und Q, deren Resultirende EH durch den festen Punkt C gehen muß, wenn Gleichgewicht am Hebel stattfinden soll.

Zieht man vom Punkte C, dem Stützpunkte des Hebels, die senkrechten Linien CF und CG auf die Richtungen der Kräfte P und Q, so hat man nach §. 22 für das Gleichgewicht

$$P : Q = CG : CF \text{ oder } Pa = Qb,$$

wenn man CF = a und CG = b setzt.

Diese Producte nennt man die Momente der Kräfte in Be-

Digitized by Google

ziehung auf den Punkt C. Die senkrechten Linien a und b heißen aber die Arme des Hebels.

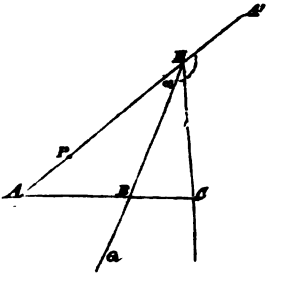
Die Kräfte P und Q suchen den Hebel in entgegengesetzten Richtungen um den Punkt C zu drehen, und die Bedingung des Gleichgewichts besteht also darin, daß diese Kräfte, von denen die eine den Namen der Last führt, im umgekehrten Verhältnisse der Hebelsarme stehen.

Der geradlinige Hebel AB kann auch durch den Hebel FCG ersetzt werden, wenn man sich die Punkte F und G durch feste gerade Linien mit dem Punkte C verbunden denkt. Dann hat man einen Winkelhebel.

Die Größe der Resultirenden EC ist nach §. 22

$$R^2 = P^2 + Q^2 + 2\,PQ\cos\alpha, \quad (1)$$

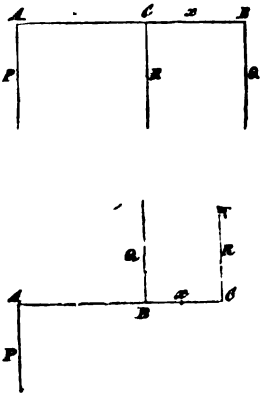
wenn α den Winkel bezeichnet, den die Richtungen der Kräfte P und Q mit einander einschließen.



Wirken aber die Kräfte P und Q auf derselben Seite des Stützpunktes C, also nach den Richtungen EA′ und EB auf ihren gemeinschaftlichen Angriffspunkt E, so ist der Winkel A′EB, den ihre Richtungen einschließen, das Supplement des Winkels α. Mithin $\cos A'EB = \cos(180° - \alpha) = \cos\alpha$, und folglich

$$R^2 = P^2 + Q^2 - 2\,PQ\cos\alpha. \quad (2)$$

Die Größe der Resultirenden bestimmt zugleich den Druck, welchen der Stützpunkt C für den Fall des Gleichgewichts auszuhalten hat.



Sind die Richtungen der Kräfte P und Q einander parallel, so entfernt sich der Punkt E in's Unendliche und der Winkel α wird verschwindend klein. Also $\cos\alpha\ (= 0) = 1$. Hieraus entspringt für den Druck auf den Stützpunkt aus (1) $R = P + Q$ und aus (2) $R = Q - P$, wenn $Q > P$, wie dies auch unmittelbar aus §. 24 hervorgeht. Die parallelen Kräfte P und Q verhalten sich aber umgekehrt wie ihre Entfernungen vom Stützpunkte. Hieraus läßt sich leicht die Lage des Stützpunktes finden, wenn die Kräfte P und Q nebst ihrer Entfernung c von einander gegeben sind.

Digitized by Google

Nennt man x den unbekannten Abstand des Stützpunktes von der größeren Kraft Q, so ist im ersten Falle, wo die parallelen Kräfte auf verschiedenen Seiten des Stützpunktes liegen,

$$P : Q = x : c - x \text{ oder}$$

$$P : P + Q = x : c, \text{ also } x = \frac{cP}{P+Q}.$$

Im zweiten Falle hingegen, wo die Kräfte im entgegengesetzten Sinne auf derselben Seite des Stützpunktes wirken,

$$P : Q = x : c + x \text{ oder}$$

$$P : Q - P = x : c, \text{ folglich } x = \frac{cP}{Q-P}.$$

Zweites Kapitel.

Von der Schwere und dem Gleichgewichte fester, schwerer Körper.

26. Unter Schwere versteht man allgemein die Anziehung, vermöge welcher alle Körper zur Oberfläche der Erde hinfallen, wenn sie nicht gehalten werden.

Wir werden später sehen, daß diese Anziehung von der materiellen Verschiedenheit der Körper unabhängig und nur den Massen zweier Körper direct und dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Bezeichnet man die Massen zweier Körper durch M und m, ihre Entfernung durch r, so findet die Anziehung, welche zwischen ihnen statt hat, ihren allgemeinen Ausdruck in der Formel $\frac{Mm}{r^2}$.

Vermöge einer solchen Anziehung können weit entfernte Körper mit einander in Verbindung gerathen, jedoch so, daß jeder noch nach allen Richtungen beweglich bleibt, falls andere bewegende Ursachen von hinreichender Stärke einwirken.

Obgleich man sich diese Anziehung zwischen den Körpern als gegenseitig zu denken hat, so kommt doch wegen der außerordentlich großen Masse der Erde im Verhältnisse zu den auf ihr befindlichen Körpern nur die Anziehung der ersteren in Betracht. Die Sache verhält sich gerade so, als ob nur von der Erde aus eine Anziehung auf diese Körper stattfände.

Wir werden später bestätigt finden, daß an demselben Orte alle Körper (sie mögen wie immer verschieden an Masse sein) gleich schnell

Digitized by Google

fallen. Auch sieht sich wohl ein, daß es einerlei ist, ob ein kleinstes Massentheilchen allein fällt, oder ob mehrere solcher Theilchen zusammen fallen. Dies gilt, wenn sich der Bewegung kein Hinderniß entgegenstellt. Ist aber ein solches vorhanden, so üben die Körper auf dasselbe einen Druck aus, welchen man ihr Gewicht nennt. Das Gewicht eines Körpers hängt ab von seiner Masse, d. h. von der Menge seiner Materie. Denn mehrere kleinste Massentheilchen werden vermöge ihrer Schwere, d. h. ihres Strebens zu fallen, einen stärkeren Druck auf das Hinderniß (z. B. auf eine Unterlage) ausüben, als ein einziges. Daher ist das Gewicht eines Körpers das Product aus seiner Masse in die Intensität der Schwere oder in die Geschwindigkeit, womit der Körper fällt. Bezeichnet man wieder allgemein die Masse durch M, das Maß der Schwere durch g und das Gewicht des Körpers durch P, so ist $P = gM$ (1).

Da an demselben Orte alle Körper mit gleicher Geschwindigkeit fallen, so ist insofern auch der Werth von g für alle Körper derselbe, und das Gewicht der Masse proportional. Während aber die Masse eines Körpers stets dieselbe bleibt, wohin er auch gebracht werde, ändert sich dagegen g von einem Orte zum anderen. Doch ist der Unterschied hinsichtlich der Werthe von g nur an Orten beträchtlich, welche weit aus einander liegen. Da die Erde an den Polen abgeplattet ist, folglich hier die Oberfläche nicht so weit vom Mittelpunkte entfernt ist als am Aequator, so muß ein und derselbe Körper an den Polen schwerer sein, als am Aequator; er muß dort schneller, hier langsamer fallen. Denn wir haben schon bemerkt, daß die Anziehung der Erde mit der Entfernung von ihrem Mittelpunkte abnimmt.

Befindet sich ein Körper innerhalb der Erde, so erleidet das Gesetz der Schwere eine Aenderung, insofern die Anziehung der unter ihm befindlichen Erdmasse durch die Anziehung der über ihm vorhandenen theilweise aufgehoben wird. Alsdann nimmt die Anziehung nicht mehr mit dem Quadrate der Entfernung ab, sondern sie wächst mit der einfachen Entfernung vom Mittelpunkte, bis der Körper wieder auf der Oberfläche der Erde angelangt ist. Im Mittelpunkte der Erde selbst muß aber die Anziehung $= 0$ sein, da sie nach allen Richtungen hin gleich groß ist. Ein Körper würde also dort, sich selbst überlassen, im Gleichgewichte schweben.

27. Da gemäß der Formel (1) das Gewicht eines Körpers seiner Masse proportional ist, so dienen die Gewichte zur Vergleichung der Massen. Die Gewichte gleichartiger Körper verhalten sich offen-

Digitized by Google

bar wie ihre Rauminhalte, und daſſelbe gilt alſo auch von den Maſſen. Die Erfahrung zeigt aber, daß ungleichartige Körper bei gleichem Rauminhalte verſchiedenes Gewicht haben. Dies rührt daher, daß ſie ungeachtet des gleichen Volumens ungleiche Quantitäten kleinſter Maſſentheilchen enthalten. Vergleicht man nun in dieſer Hinſicht zwei Körper von gleichem Volumen mit einander, ſo nennt man denjenigen, welcher die größte Menge Materie hat, den dichteren, und zwar in demſelben Verhältniſſe, als er mehr Gewicht hat. Bezeichnet man durch D die in der Einheit des Volumens enthaltene Maſſe eines Körpers, was man ſeine Dichtigkeit nennt, ſo iſt, wenn V den Rauminhalt des Körpers bedeutet,

$$M = DV.$$

Dieſen Werth für M in die Formel (1) geſetzt giebt

$$P = gDV \quad (2).$$

Bezeichnet man bei einem anderen Körper von demſelben Rauminhalt das Gewicht durch P′ und die Dichtigkeit durch D′, ſo hat man ebenſo $P' = gD'V$. Daher

$$P : P' = gDV : gD'V = D : D',$$

d. h. bei zwei Körpern von gleichem Rauminhalte verhalten ſich die Gewichte wie die Dichtigkeiten derſelben.

Die Gewichte gleicher Volumina verſchiedenartiger Körper nennt man ihre ſpecifiſchen Gewichte. Im Weſentlichen ſind alſo die Dichtigkeit und das ſpecifiſche Gewicht eines Körpers daſſelbe.

Das Gewicht eines Körpers ohne Rückſicht auf das Volumen heißt ſein abſolutes Gewicht, während es ſpecifiſches genannt wird, wenn man es auf eine beſtimmte Einheit des Volumens bezieht. Setzt man in Formel (2) $V = 1$, ſo erhält man $gD = S$ als Ausdruck für das ſpecifiſche Gewicht. Daher

$$P = SV \text{ und } S = \frac{P}{V} \quad (3).$$

Um das ſpecif. Gewicht der Körper zu beſtimmen, muß man das ſpecif. Gewicht irgend eines anderen Körpers zur Einheit nehmen. Man hat hierzu das Waſſer im Zuſtande ſeiner größten Dichtigkeit gewählt, welche ungefähr 4° C. entſpricht. Bei phyſikaliſchen Unterſuchungen nimmt man als Gewichtseinheit das Gramme, welches das Gewicht eines Cubikcentimeters deſtillirten Waſſers iſt. Das ſpecif. Gewicht eines Körpers iſt hiernach die Zahl, welche angiebt, wie vielmal derſelbe ſchwerer iſt, als ein gleiches Volumen Waſſer. Wenn alſo das ſpecif. Gewicht z. B. des Goldes = 19,288 Gr. iſt, ſo heißt dies, ein Cubikcentimeter Gold wiegt 19,288mal mehr

Digitized by Google

als ein Cubikcentimeter Waſſer, u. ſ. w. So findet man allgemein das ſpecif. Gewicht eines Körpers, wenn man ſein abſolutes Gewicht durch das Gewicht eines gleichen Volumens Waſſer dividirt, gemäß der Formel (3).

Will man das ſpecif. Gewicht irgend einer Flüſſigkeit beſtimmen, ſo nehme man ein Fläſchchen, deſſen Gewicht man vorher durch eine Wage ermittelt hat. Man fülle es mit Waſſer und wäge es abermals. Wird nun von dem erhaltenen Gewichte das Gewicht des leeren Fläſchchens abgezogen, ſo bekommt man das Gewicht des Waſſers, das es bei einer beſtimmten Temperatur aufnehmen kann. Auf dieſelbe Weiſe läßt ſich ermitteln, wieviel das Fläſchchen von der zu prüfenden Flüſſigkeit faſſen kann. Es ſei z. B. das ſpecif. Gewicht der Schwefelſäure zu beſtimmen.

Das Fläſchchen faſſe Waſſer 20,800 Grammen,
Schwefelſäure 38,400 „

Daher das ſpec. Gewicht der Schwefelſäure $\frac{38,400}{20,800} = 1,850$ Gr.

Iſt das ſpecif. Gewicht eines ſtarren Körpers zu ermitteln, ſo bilde man aus demſelben einen regelmäßigen Körper, z. B. einen Würfel, deſſen abſolutes Gewicht durch eine Wage beſtimmt werden kann. Ein Würfel von Marmor z. B. wiege 21,6 Gr. Iſt nun die Seite dieſes Würfels 2 Centimeter lang, ſo beträgt ſein Rauminhalt 8 Cubikcentimeter. Ein gleich großer Würfel von Waſſer muß demnach 8 Gramme wiegen, da 1 Cubikcentimeter Waſſer 1 Gramme wiegt. Daher das ſpecif. Gewicht des Marmors $= \frac{21,6}{8} = 2,7$ Gr.

Uebrigens kann man ſich zur Ermittelung des ſpecif. Gewichtes ſtarrer Körper auch des obigen Fläſchchens bedienen, zumal da nicht von allen Körpern ſolche Maſſen zu Gebote ſtehen, um regelmäßige Formen daraus bilden zu können. Ueberhaupt iſt in den meiſten Fällen die Verfertigung eines regelmäßigen Körpers außerordentlich ſchwierig. Es ſei z. B. das ſpecif. Gewicht der Platinakörnchen zu ermitteln.

Das Fläſchchen mit Waſſer wiege 13,52 Gr.
Die Körnchen . . . . . 4,056 „
Beides zuſammen . . . . . 17,576 „

Wirft man nun die Körner in's Fläſchchen, ſo wird etwas Waſſer herausfließen, indem es durch die Körner verdrängt wird. Nachdem man das ausgefloſſene Waſſer ſorgfältig abgeputzt hat, beſtimme man das Gewicht des Fläſchchens mit den Körnern und dem zurück-

Digitized by Google

gebliebenen Waſſer. Sei dieſes Gewicht = 17,316 Gr. Dann iſt das Gewicht des durch die Körner verdrängten Waſſers gewiß = 17,576 — 17,316 = 0,26 Gr. Dies iſt aber das Gewicht des Waſſers, deſſen Volumen dem Volumen der Körner gleich iſt. Mithin das ſpecif. Gewicht der Platinkörnchen $\frac{4,056}{0,26}$ = 15,6 Gr.

Sollte ſich der Körper, deſſen ſpecif. Gewicht zu beſtimmen iſt, im Waſſer auflöſen, ſo muß man natürlich eine Flüſſigkeit anwenden, worin der Körper nicht löslich iſt. Außerdem verfährt man ganz nach der vorigen Weiſe, nur daß man das Reſultat noch mit dem ſpecifiſchen Gewicht der angewendeten Flüſſigkeit zu multipliciren hat.

In der Folge werden ſich uns noch andere Methoden zur Beſtimmung des ſpecif. Gewichts darbieten.

28. Die Richtung eines frei fallenden Körpers iſt ſenkrecht zur Oberfläche der Erde. Da nun die Erde eine faſt kugelförmige Geſtalt hat, ſo müſſen die Richtungen der Schwere an verſchiedenen Orten in ihrem Mittelpunkte zuſammentreffen. Doch kann man wegen der bedeutenden Größe des Erdhalbmeſſers im Vergleich zur geringen Ausdehnung der meiſten Körper auf der Erde faſt ohne Fehler annehmen, daß die Richtungen der Schwere in der ganzen Ausdehnung eines und deſſelben dieſer Körper parallel ſeien.

Da ſich nun die Wirkung der Schwere auf alle kleinſten Maſſentheilchen eines Körpers erſtreckt, ſo werden ſie alle von parallelen gleichen Kräften getrieben. Die Reſultirende dieſer parallelen Kräfte, welche das Gewicht des Körpers iſt, wird ihrer Summe gleich ſein und immer durch denſelben Punkt des Körpers gehen (§. 24). Man nennt dieſen Punkt, welcher alſo der Mittelpunkt der parallelen Kräfte iſt, den Schwerpunkt des Körpers. Hieraus folgt, daß ein Körper, wenn er in ſeinem Schwerpunkte unterſtützt wird, in allen Lagen im Gleichgewichte bleiben muß. Denn die Reſultirende aller einzelnen Wirkungen der Schwere wird ſtets durch ſeinen Schwerpunkt gehen und daſelbſt aufgehoben werden.

Nach dem Vorigen läßt ſich alſo das Gewicht eines Körpers als eine Kraft betrachten, welche im verticalen Sinne an dem Schwerpunkte deſſelben angebracht iſt.

Hängt man einen feſten Körper mittelſt eines Fadens auf, ſo muß die Richtung des Fadens vertical ſein und gehörig verlängert durch den Schwerpunkt des Körpers gehen. Befeſtigt man den Faden ebenſo an einem anderen Punkte des Körpers, ſo muß ſeine Verlängerung abermals durch den Schwerpunkt gehen. Beide Verlängerungen

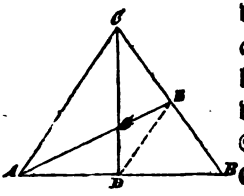
Digitized by Google

werden sich also im Schwerpunkte des Körpers schneiden. Auf diese Weise läßt sich praktisch in verschiedenen Körpern die Lage des Schwerpunktes bestimmen.

Uebrigens ist die Bestimmung des Schwerpunktes eine Aufgabe, zu deren vollständiger Lösung die Hülfe der Integralrechnung erforderlich ist. Doch reichen in einigen Fällen auch einfache geometrische Betrachtungen zu.

So liegt offenbar der Schwerpnnkt einer geraden Linie von gegebener Länge in ihrer Mitte.

Um den Schwerpunkt eines gleichartigen Dreiecks ACB zu finden, verbinde man den Punkt C durch eine Gerade mit der Mitte der Seite AB. Dann liegen die Schwerpunkte aller Linien, die sich der AB parallel ziehen lassen, auf der Linie CD, weil sie alle von dieser halbirt werden. Demnach liegt auch der Schwerpunkt des Dreiecks selbst in der Linie CD. Verbindet man ebenso den Punkt A mit der Mitte der Seite CB, so liegen wieder die Schwerpunkte aller mit CB parallelen Linien auf der Geraden AE, also auch der Schwerpunkt des Dreiecks, welcher mithin der Lage nach durch den Durchschnittspunkt G der Linien CD und AE bestimmt wird. Zieht man noch die Gerade DE, welche mit AC parallel sein wird, so ist wegen der ähnlichen Dreiecke ACG, DGE und ACB, DEB:



$$CG : GD = AC : DE \text{ und } AC : DE = CB : EB = 2 : 1.$$

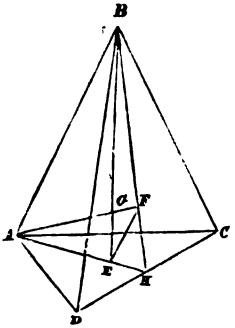
Also auch $CG : GD = 2 : 1$ und $CD : GD = 3 : 1$.

Demnach $GD = \frac{1}{3} CD$.

Hieraus läßt sich nun wieder der Schwerpunkt eines beliebigen Vielecks finden, wenn man es in Dreiecke zerlegt und von jedem den Schwerpunkt bestimmt. Die Gewichte der einzelnen Dreiecke, welche an ihren Schwerpunkten wirken, sind parallele Kräfte, von denen sich die Resultirende auf bekannte Weise bestimmen läßt, womit zugleich der Schwerpunkt des Vielecks gefunden ist.

Soll der Schwerpunkt einer dreiseitigen Pyramide ermittelt werden, so verbinde man die Spitze B mit dem Schwerpunkte des gegenüberstehenden Dreiecks ADC. Auf der Geraden BE liegen nun, wie leicht einzusehen, die Schwerpunkte aller mit ADC parallelen Dreiecke, und deshalb auch der Schwerpunkt der Pyramide. Verbindet man aber den Eckpunkt A mit dem Schwerpunkte F des Dreiecks

Digitized by Google



DBC, so enthält die Linie AF wieder die Schwerpunkte aller mit DBC parallelen Dreiecke, welche sich, wie die vorigen, als die Elemente der Pyramide betrachten lassen. Mithin muß auch der Schwerpunkt der Pyramide auf der Geraden AF liegen, und seine Lage bestimmt sich durch den Durchschnittspunkt G der Linien BE und AF. Zieht man EF und AH, so ist in den ähnlichen Dreiecken EGF, ABG und EHF, ABH:

$$BG : GE = AB : EF, \quad AB : EF = BH : FH = 3 : 1,$$

weil F der Schwerpunkt des Dreiecks BDC. Mithin auch

$$BG : GE = 3 : 1 \text{ und } BF : GE = 4 : 1 \text{ oder}$$
$$GE = \tfrac{1}{4} BF.$$

Eben so liegt der Schwerpunkt eines Kegels mit kreisförmiger Basis in der Axe desselben. Seine Entfernung von dem Mittelpunkte der Basis beträgt $\frac{1}{4}$ von der Länge der Axe.

Auch läßt sich der Schwerpunkt einer beliebigen vielseitigen Pyramide bestimmen, wenn man sie in dreiseitige Pyramiden zerlegt. Man wird finden, daß der Schwerpunkt der ganzen Pyramide wieder auf der Geraden liegt, welche die Spitze mit dem Schwerpunkte der Grundfläche verbindet. Seine Entfernung von der letzteren beträgt gleichfalls $\frac{1}{4}$ der erwähnten Linie.

Man erkennt ohne Weiteres, daß der Schwerpunkt des Kreises oder der Ellipse, der Kugel oder des Ellipsoids im Mittelpunkt der Figur liegt, der Schwerpunkt eines Cylinders mit parallelen Grundflächen aber im Mittelpunkte seiner Axe. Der Schwerpunkt eines Parallelogramms muß im Durchschnitte seiner beiden Diagonalen, der eines Parallelopipedums im Durchschnittspunkte seiner vier Diagonalen liegen.

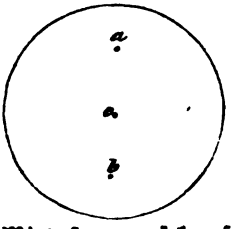
Bei einem Körper von ungleichförmiger Dichtigkeit liegt der Schwerpunkt den dichteren Theilen näher.

Uebrigens wollen wir hier noch bemerken, daß der Schwerpunkt eines Körpers nur von der Masse und deren Vertheilung abhängt, und eigentlich die Wirkung der Schwere nicht voraussetzt. Wohin auch der Körper gebracht werde, sein Schwerpunkt behält immer dieselbe Lage, selbst im unendlich leeren Raume. Aus diesem Grunde haben ihn auch Einige den Mittelpunkt der Trägheit genannt.

29. Wenn ein Körper in seinem Schwerpunkte unterstützt ist, so wissen wir, daß er in allen Lagen im Gleichgewichte bleibt. Ist

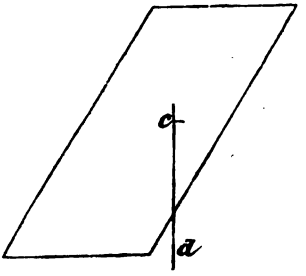
Digitized by Google

aber der Körper in einem anderen Punkte unterstützt, so findet nur dann Gleichgewicht statt, wenn der Schwerpunkt vertical über oder unter dem Unterstützungspunkt liegt. In beiden Fällen wird die Wirkung der Schwere aufgehoben; denn, wie schon bekannt, ist das Gewicht des Körpers als eine Kraft zu betrachten, welche im Schwerpunkte vertical abwärts wirkt. Doch ist im ersten Falle das Gleichgewicht nicht dauernd oder, wie man gewöhnlich zu sagen pflegt, labil, im zweiten aber dauernd (stabil). Man habe z. B. eine

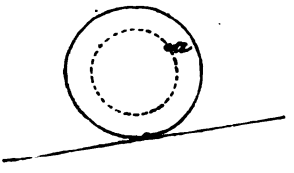


Scheibe mit zwei Löchern a und b, von denen eines vertical über, das andere vertical unter dem Schwerpunkte c liegt. Steckt man nun eine Axe, um welche sich die Scheibe drehen läßt, durch das Loch b, so ist Gleichgewicht vorhanden, so lange der Schwerpunkt vertical über b liegt. Wird aber die Scheibe nur im Mindesten verrückt, so ist das Gleichgewicht aufgehoben, indem sich der Schwerpunkt so lange dreht, bis er in eine Lage vertical unter b kommt. Geht aber die Axe durch das Loch a, so mag man die Scheibe nach rechts oder links drehen, sie kehrt wegen Einwirkung der Schwere stets in ihre vorige Gleichgewichtslage zurück. Hier ist also das Gleichgewicht dauernd, dort aber nicht.

Auf einer horizontalen Unterlage kann ein Körper nur dann im Gleichgewichte sein, wenn die durch den Schwerpunkt gezogene Verticale innerhalb der Basis fällt. Befindet sich der Schwerpunkt des



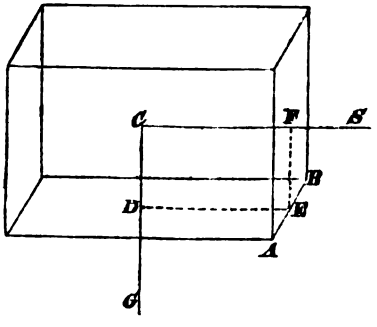
nebenstehenden Körpers in c, so wirkt sein Gewicht vertical abwärts nach cd. Die Wirkung der Schwere wird also nicht durch den Widerstand der Unterlage aufgehoben: der Körper muß umfallen. Daher sucht ein Körper, wenn ihn sonst nichts hindert, stets eine solche Lage zu gewinnen, wobei sein Schwerpunkt möglichst tief zu liegen kommt.



Wird eine ungleichartige Scheibe, deren Schwerpunkt in a liegt, auf eine schiefe Ebene gesetzt, wie es die Figur zeigt, so muß sie nach dem Vorstehenden so lange aufwärts rollen, bis ihr Schwerpunkt die möglich tiefste Lage erreicht hat.

Digitized by Google

Soll ein Körper, welcher auf einer horizontalen Ebene ruht, umgeworfen werden, so muß er um eine seiner Kanten AB gedreht werden. Sobald der Schwerpunkt vertical über der Umdrehungskante steht, fällt der Körper von selbst um, falls die umwerfende Kraft noch im Geringsten fortwirkt. Läßt aber die Kraft eher nach, als der Schwerpunkt in die erwähnte Lage gekommen ist, so kehrt der Körper von selbst in seine vorige Lage zurück. Sei der Schwerpunkt des Körpers C, das Gewicht desselben, welches am Punkte C vertical abwärts wirkt, G, die Kraft, welche den Körper durch Ziehen umzuwerfen strebt, S. Dann hat man in Beziehung auf die Umdrehungskante AB den Winkelhebel DEF, für welchen ist Sh — Gb, also



$$S = \frac{Gb}{h}, \text{ wenn } DE = b \text{ und } EF = h.$$

Man erkennt, daß die Stabilität (Standfähigkeit) eines Körpers unter übrigens gleichen Umständen um so größer ist,

1) je größer sein Gewicht ist,

2) je breiter seine Basis ist, weil man dann auch seinen Schwerpunkt um so höher heben muß, ehe er vertical über der Umdrehungskante zu stehen kommt.

3) je kleiner h, d. h. je tiefer sein Schwerpunkt liegt, aus demselben Grunde, wie in 2.

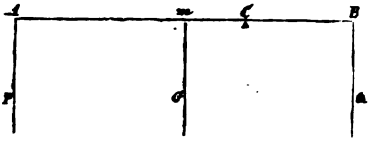
Drittes Kapitel.

Vom Gleichgewichte an den sogenannten einfachen Maschinen.

30. Die Bedingungen des Gleichgewichts am Hebel haben wir schon im §. 25 entwickelt, wo wir ihn als eine feste, gewichtslose Linie betrachteten. Das dort Gesagte läßt sich aber leicht auf einen wirklichen Hebel, der irgend eine gerade oder krumme Stange sein kann, anwenden, wenn man sich das Gewicht desselben in seinem Schwerpunkte vereinigt denkt. Sei AB ein solcher Hebel, an dessen

Digitized by Google

Endpunkten die Kräfte P und Q nach parallelen Richtungen wirken. Sein Gewicht — G wirkt im Schwerpunkte m vertical abwärts.



Ist C der Stützpunkt des Hebels, so ist AC — p der Hebelsarm von P und BG — q der von Q; die Entfernung des Schwerpunktes m von C sei — s. Dann hat man offenbar für das Gleichgewicht

$$P \cdot p + G \cdot s = Q \cdot q.$$

31. Zu den wichtigsten Anwendungen des Hebels gehört die Wage, welche zur Gewichtsbestimmung der Körper vermittelst eines Gegengewichtes dient. Von besonderer Wichtigkeit für uns ist die gemeine Wage oder sogenannte Krämerwage. Soll sie ihrem Zwecke entsprechen, so muß der Wagbalken unbelastet eine horizontale Lage annehmen, und diese auch dann beibehalten, wenn auf die Wagschalen gleiche Gewichte gelegt werden. Man sieht sogleich, daß dies nur möglich ist, wenn der Schwerpunkt des Wagbalkens unter seinem Drehpunkte liegt. Fielen beide zusammen, so würde das Gleichgewicht in jeder Lage stattfinden. Das Gewicht eines Körpers könnte also nicht durch die horizontale Lage des Wagbalkens erkannt werden, wie es doch geschehen soll.

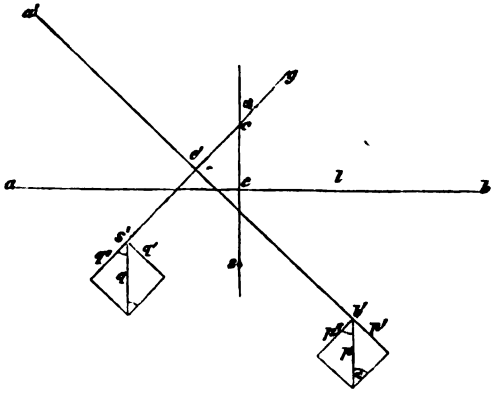
Eben so wenig kann er über dem Drehpunkte liegen, weil dann der Wagbalken bei der geringsten Erschütterung umschlagen würde, bis sein Schwerpunkt vertical unter dem Drehpunkte läge. Wenn aber der Schwerpunkt unter dem Drehpunkte liegt, so wird der Wagbalken, sobald man ihn durch eine Berührung aus dem Gleichgewichte bringt, nach einigen Schwankungen wieder in die horizontale Lage zurückkehren.

Verbindet man die Aufhängepunkte der Wagschalen durch eine gerade Linie, so hat man die Längenare des Balkens. Eine senkrechte Linie, welche die Längenare halbirt, muß durch den Dreh- und Schwerpunkt des Wagbalkens gehen, und ist überdies die Zunge der Wage.

Befinden sich auf den Schalen gleiche Gewichte, so wird der Balken in seiner horizontalen Lage bleiben. Wird aber auf einer Seite ein Uebergewicht angebracht, so muß er sich nach dieser Seite hin neigen und einen Winkel mit der Horizontalen machen, welchen man den Ausschlag nennt. Von einer guten Wage verlangt man nun, daß sie beim kleinsten Uebergewicht schon einen großen Ausschlagwinkel zeige. Man nennt sie dann empfindlich.

Digitized by Google

Es sei nun a b die Längenaxe eines Wagbalkens, der mittelst seiner Schalen von gleichen Gewichten belastet ist. Der Mittelpunkt dieser Axe sei e, der Drehpunkt des Balkens c und der gemeinschaftliche Schwerpunkt der Schalen, der gleichen Gewichte und des Wagbalkens s. Es weder auf der rechten Seite ein Uebergewicht p angebracht, dann muß sich der Balken neigen und etwa die Lage a′b′ annehmen. Der Ausschlagwinkel sei = α, welches zugleich der Winkel ist, den die Zunge c g mit der Verticalen macht. Am Schwerpunkte s wirkt die Summe der gleichen Gewichte nebst den Gewichten der Schalen und des Balkens vertical abwärts. Sei die Summe aller dieser Gewichte = q. Da die Lage des Balkens eine andere geworden, so muß auch der Schwerpunkt s seine Lage verändert haben und sich etwa in s′ befinden. Das Gewicht q läßt sich zerlegen nach der Richtung s′ c und senkrecht darauf. Durch den Widerstand des festen Punktes c wird q″ ganz aufgehoben, während q′ am Hebelsarme s′c den Wagbalken in die horizontale Lage zurückzuführen sucht. Auf dieselbe Weise zerlegt sich das Uebergewicht p in p′ und p″. Indem letzteres am Punkte b′ abwärts zieht, wirkt ersteres am Hebelsarme e′c und strebt dadurch nach der horizontalen Lage des Wagbalkens. Da p′ und q′ nach demselben Ziele hinstreben, während p″ ihnen entgegenwirkt, so hat man offenbar für's Gleichgewicht



$$q' . s'c + p' . e'c = p'' . e'b'.$$

Nun ist $q' = q \sin \alpha$, $p' = p \sin \alpha$, $p'' = p \cos \alpha$.

Dies berücksichtigt erhält man

$$q \sin \alpha . s'c + p \sin \alpha . e'c = p \cos \alpha . l, \text{ da } e'b' = eb = l.$$

Dividirt man beiderseits durch cos α, so kommt

$$q \operatorname{tang} \alpha . s'c + p \operatorname{tang} \alpha . e'c = p . l$$

und hieraus

$$\operatorname{tang} \alpha = \frac{p . l}{q . s'c + p . e'c}.$$

Man sieht nun, daß der Ausschlagwinkel α oder die Empfindlichkeit der Wage um so größer ist,

Digitized by Google

1) je größer unter sonst gleichen Umständen l, d. h. die Länge des Wagbalkens ist;

2) je kleiner s'c, d. h. je näher der Schwerpunkt s unter dem Drehpunkte c liegt;

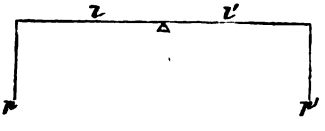
3) je kleiner q, d. h. je leichter die Wage und namentlich der Wagbalken ist. Natürlich ist dies innerhalb gewisser Grenzen (mit Rücksicht auf Haltbarkeit ꝛc.) zu verstehen;

4) je kleiner e'c, d. h. je näher der Mittelpunkt der Längenare, welcher sich zugleich als Schwerpunkt der gleichen Gewichte in den Schalen betrachten läßt, unter dem Drehpunkte c liegt. Man kann e'c = 0 setzen, dann fällt der Drehpunkt mit jenem Mittelpunkte zusammen, und es ist noch

$$\text{tang } \alpha = \frac{p \cdot l}{q \cdot s'c}.$$

Obgleich es für die Empfindlichkeit der Wage wichtig ist, daß der Schwerpunkt s des Wagbalkens und der Schalen möglichst nahe unter dem Drehpunkte liegt, so darf er doch nicht damit zusammenfallen, wie wir dies schon zu Anfang bemerkt haben. Auch lehrt es die Formel. Denn setzen wir s'c = 0, so ist tang $\alpha = \infty$, also $\alpha = 90^0$, d. h. der Wagbalken schlägt bei dem geringsten Uebergewichte ganz um, indem er eine verticale Stellung annimmt.

Eine Wage kann unbelastet richtig scheinen, ohne es wirklich zu sein. Um sie in dieser Hinsicht zu prüfen, setze man an ihr zwei Gewichte in's Gleichgewicht und verwechsele diese nachher mit einander. Wenn sich nun hierbei die Ruhelage des Balkens ändert, so ist die Wage unrichtig. Doch kann man auch mittelst einer solchen Wage das Gewicht eines Körpers richtig bestimmen. Man habe eine Wage, deren Hebelsarme nicht genau von gleicher Länge sind, bei welcher also der Drehpunkt nicht vollkommen dem Mittelpunkte der Längenare entspricht. Das durch diese Wage zu bestimmende Gewicht eines Körpers sei = x. Legt man den Körper in die Wagschale rechts, so sei links das Gegengewicht p nöthig, um das Gleichgewicht herzustellen, und wenn er in die Schale links gelegt wird, so sei rechts zu demselben Zwecke das Gewicht p' nöthig. Dann ist gewiß im ersten Falle



$$p \cdot l = x \cdot l'$$

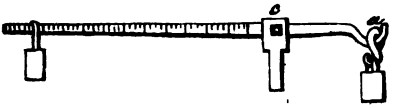
und im zweiten $\quad p' \cdot l' = x \cdot l.$

Digitized by Google

Beide Gleichungen mit einander multiplicirt und dann durch l . l' dividirt geben

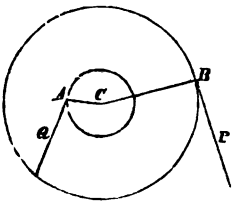
$$p \cdot p' = x^2 \text{ oder } x = \sqrt{p \cdot p'}$$

Die bisher betrachtete Wage war im Wesentlichen ein gleicharmiger Hebel. Die sogenannte Schnellwage oder römische Wage ist aber eine Anwendung des ungleicharmigen Hebels. Der Drehpunkt des letzteren befinde sich bei c, der Aufhängepunkt der Schale oder ein Haken bei a.



Wird nun eine Last auf die Schale gelegt oder an den Haken gehängt, so wirkt dieselbe am Hebelsarme ac, während am längeren Arme ein sogenanntes Laufgewicht hin- und hergeschoben werden kann, um der Last das Gleichgewicht zu halten. Der längere Arm ist eingetheilt und der Theilstrich, bei welchem sich das Laufgewicht befinden muß, um das Gleichgewicht herzustellen, giebt das Gewicht der Last an. Uebrigens hängt die Empfindlichkeit der Schnellwage von ähnlichen Umständen ab, wie die der gemeinen.

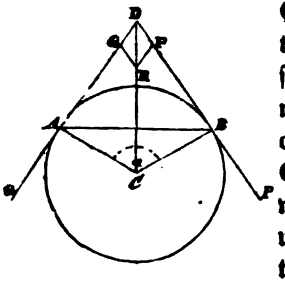
32. Die Gesetze des Hebels finden auch beim Rad an der Welle ihre Anwendung. Die Welle besteht aus einem um seine Axe beweglichen Cylinder, welcher auf der Ebene des Rades senkrecht steht, so daß die Axen des Cylinders und des Rades zusammenfallen. Sei die beigegebene Figur der Querschnitt eines Wellrades. Die Kraft wirkt am Umfange des Rades, die Last am Umfange der Welle. Nun verhalten sich nach den Gesetzen des Hebels für den Fall des Gleichgewichtes P : Q = AC : BC, d. h. umgekehrt wie die Halbmesser des Rades und der Welle.



Das Wellrad wird häufig als Haspel oder Winde gebraucht zum Heben oder Fortschaffen von Lasten. Bei der Winde steht die Umdrehungsaxe vertical.

33. Die Rolle ist eine runde, am Rande ausgehöhlte Scheibe, welche um eine durch ihren Mittelpunkt gehende Axe drehbar ist. Findet nur eine Drehung um diese Axe statt, so heißt die Rolle eine feste, außerdem eine bewegliche, wenn nämlich neben der Drehung noch eine sonstige Bewegung möglich ist. Sei nun auf den Umfang einer festen Rolle ein Seil gelegt, an dessen Enden die Kräfte P und

Digitized by Google

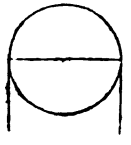


Q nach den in der Figur angegebenen Richtungen wirken. Der Halbmesser der Rolle sei = r. Soll Gleichgewicht bestehen, so muß offenbar sein Pr = Qr, d. h. P = Q oder die Kraft gleich der Last. Der Punkt C hat einen Druck auszuhalten, welcher gewiß der Resultirenden der beiden Kräfte P und Q gleich ist. Die Richtungen der letzteren werden sich im Punkte D schneiden, der als gemeinschaftlicher Angriffspunkt betrachtet werden kann. Nach dem Parallelogramme der Kräfte läßt sich leicht die Resultirende von P und Q bilden, wie es die Figur zeigt. Nun ist jedes der Dreiecke am Punkte D dem Dreieck ABC ähnlich, weil die entsprechenden Seiten bei gehöriger Verlängerung auf einander senkrecht sind. Demnach hat man R : P = s : r, R : Q = s : r, wenn die Sehne AB = s gesetzt wird. Also verhält sich die Resultirende R zu jeder der Seitenkräfte wie die Sehne des vom Seile umfaßten Bogens zum Halbmesser der Rolle. Der Druck, welchen der Punkt C zu tragen hat, ist folglich

$$R = \frac{Ps}{r} \text{ oder } = \frac{Qs}{r}.$$

Bekanntlich ist aber $\frac{s}{2r} = \sin\frac{\alpha}{2}$, $\frac{s}{r} = 2\sin\frac{\alpha}{2}$, mithin

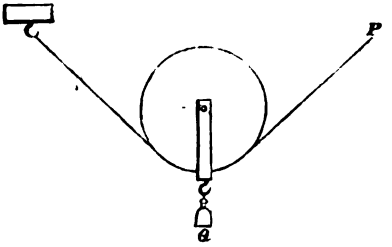
$$R = 2P\sin\frac{\alpha}{2}.$$

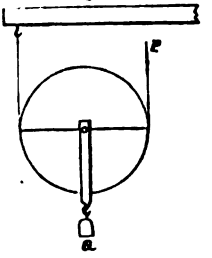


Wirken Kraft und Last parallel, so ist s = 2r und der Druck auf die Axe der Rolle = 2 P, wie aus den Formeln sogleich hervorgeht, wenn man für s den angeführten Werth setzt. Der Winkel α ist dann = 180°, $\frac{\alpha}{2}$ = 90° und sin 90° = 1. Der Druck ist also gleich der Summe beider Kräfte.

Bei der beweglichen Rolle kann ebenfalls nur Gleichgewicht bestehen, wenn die Kräfte, welche das Seil spannen, beiderseits gleich sind. Hier ist aber das eine Seilende irgend wie befestigt, während am anderen die Kraft P wirkt. Die eigentliche Last Q hängt aber in der Regel an einem Haken, welcher an der Scheere der Rolle befestigt ist, wie die folgende Figur zeigt. Offenbar ist die Last Q der oben bestimmten Resultirenden gleich, aber entgegengesetzt gerichtet, indem sie an der Axe vertical herabwirkt. Wir haben also für das Gleichgewicht

Digitized by Google



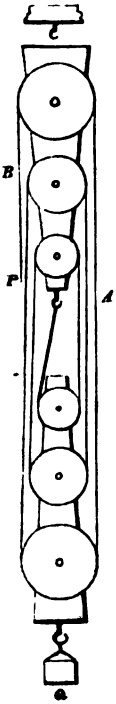


$$P : Q = r : s,$$

wo s wieder die Sehne des vom Seile umfaßten Bogens bezeichnet. Sind die beiden Seilenden einander parallel, so ist, da $s = 2r$,

$$P : Q = r : 2r = 1 : 2, \quad P = \frac{Q}{2}.$$

In diesem Falle kann man also der Last mit ihrem halben Gewichte das Gleichgewicht halten. —



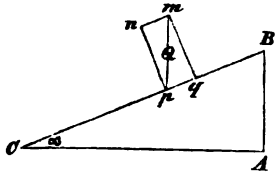
Werden zwei oder mehrere Rollen so mit einander verbunden, daß sie eine gemeinsame Scheere haben, so hat man ein Rollensystem, das man seiner gewöhnlichen Form wegen Flasche nennt. Die Verbindung zweier Flaschen, von denen die eine fest, die andere beweglich ist, giebt einen Flaschenzug. Diese Verbindung geschieht nun dadurch, daß ein einziges Seil über alle Rollen geht und zwar abwechselnd von einer beweglichen auf eine feste.

Man sieht leicht, daß die Last Q, welche am unteren Ende der beweglichen Flasche hängt, sich auf alle Seilstücke gleichförmig vertheilen muß, da sie doch von dem ganzen Seile getragen werden soll. Daher findet in jedem Seilstücke eine gleiche Spannung statt. Ist nun die Anzahl der Rollen und folglich auch der Seilstücke $= n$, so ist jedes Seilstück durch $\frac{1}{n}$ der Last Q gespannt. Soll Gleichgewicht bestehen, so muß die Spannung in den beiden äußeren Seilstücken A und B gleich groß sein, und da sie für A $\frac{Q}{n}$ beträgt, so muß auch an B ein Gewicht hängen, welches $\frac{Q}{n}$ gleichgeltend ist. Daher hat man allgemein $P = \frac{Q}{n}$

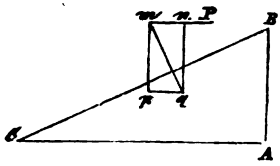
Digitized by Google

Ist z. B. Q = 100 Pfund, n = 6 wie in unserer Figur, so wird $P = \frac{100}{6} = 16\,^2/_3$ Pfund sein, d. h. in diesem Falle hält eine Kraft von $16\,^2/_3$ Pfd. einer Last von 100 Pfd. das Gleichgewicht.

34. Man nennt eine Ebene schief, wenn sie mit der Horizontalen einen Winkel macht. Es sei AB = h die Höhe, AC = b die Basis, BC = l die Länge einer schiefen Ebene, die gegen den Horizont die Neigung α hat. Auf ihr liege ein Körper, dessen Gewicht = Q sei. Geht nun die Linie mp, welche dieses Gewicht vorstellen mag, vertical durch den Schwerpunkt des Körpers, so zeigt sie zugleich die Richtung an, in welcher die Schwere auf den Körper wirkt. Nach dem Parallelogramm der Kräfte zerlegt sich mp in mn parallel mit der Länge der schiefen Ebene und in mq senkrecht darauf. Nun ist mn = P die Kraft, welche den Körper längs der schiefen Ebene hinabzutreiben sucht. Da Dreieck mnp ähnlich dem Dreieck ACB, so ist mn : mp = h : l oder P : Q = h : l, d. h. P verhält sich zum Gewichte des Körpers wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge. Soll also Gleichgewicht stattfinden, so muß man eine Kraft anwenden, welche P gleich und entgegengesetzt ist. Es ist $P = Q \cdot \frac{h}{l}$ oder, da $\frac{h}{l} = \sin \alpha$, $P = Q \cdot \sin \alpha$. Durch mq wird der Druck dargestellt, welchen der Körper senkrecht gegen die schiefe Ebene ausübt. Bezeichnet man diesen Druck durch D, so ist, wie man sogleich einsieht, $D = Q \cos \alpha$.



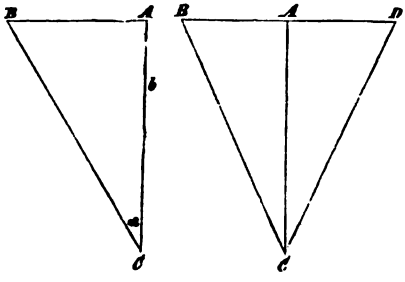
Wirkt die Kraft P, welche den Körper zurückhalten soll, parallel mit der Basis der schiefen Ebene, so ist, wegen der ähnlichen Dreiecke mnq und ACB, mn : nq = h : b oder P : Q = h : b, d. h. wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Basis.



35. Auf die Gesetze der schiefen Ebene läßt sich leicht die Wirkung des Keils zurückführen, welcher gewöhnlich zum Spalten fester Körper dient. Die Keile werden aber auch zum Heben von Lasten gebraucht, indem man sie unter die letzteren treibt, sowie zu mancherlei anderen Zwecken.

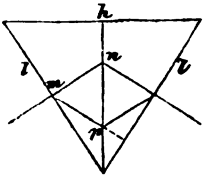
Es sei ACB der Durchschnitt eines dreiseitigen senkrechten Prisma. AB = h der Rücken, AC = b die Höhe und BC = l die

Länge des Keils. Wirkt nun die Kraft P senkrecht auf den Rücken des Keils, der Widerstand Q, welchen der Keil beim Eintreiben findet, aber senkrecht gegen b hin, so hat man den zu Ende des §. 34 erwähnten Fall bei der schiefen Ebene. Also ist auch hier P : Q = h : b, woraus folgt $P = Q \cdot \frac{h}{b} = Q \cdot \text{tang } \alpha$.

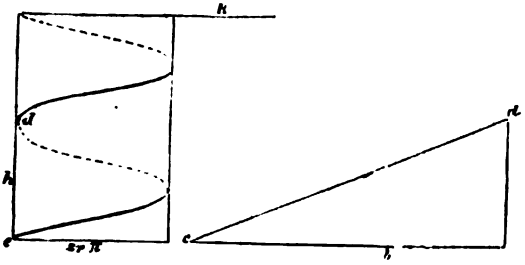


Hat man es mit einem gleichschenkligen Keil (wie in Fig. 2) zu thun, so ist, wenn man beide Seiten berücksichtigt, $P = Q \cdot \frac{2h}{b}$ oder auch $P = Q \cdot \frac{h}{\frac{b}{2}}$, falls $AB = AD = \frac{h}{2}$ gesetzt wird.

Wirkt aber Q senkrecht gegen l, l und P, wie vorher, senkrecht auf den Rücken, so kann man, wie die Figur zeigt, das Parallelogramm der Kräfte P und Q construiren, wenn die Wirkungslinie von Q bis n verlängert wird. Die Dreiecke mnp und hll sind ähnlich, weil ihre Seite auf einander senkrecht stehen. Deshalb P : Q = h : l, insofern P : Q = np : mn.



36. Denkt man sich um einen Cylinder ein rechtwinkliges Dreieck so herumgelegt, daß die Grundlinie b den Umfang des Grundkreises genau umschließt, so bildet die Hypothenuse cd eine krumme Linie, die gehörig fortgesetzt Schraubenlinie genannt wird. Jedes Stück derselben, wie cd, heißt Schraubengang, dessen Höhe = h, d. h. gleich der Höhe des rechtwinkligen Dreiecks ist.

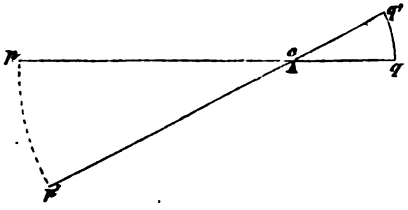


Befinden sich nun an einem soliden Cylinder längs der Schraubenlinie Hervorragungen, so nennt man ihn Schraubenspindel,

Digitized by Google

während ein hohler Cylinder mit Vertiefungen von derselben Form Schraubenmutter genannt wird. Werden beide so mit einander verbunden, daß die Erhöhungen der einen genau in die Vertiefungen der anderen passen, so hat man eine Schraube, welche theils zum Heben von Lasten, theils als Presse gebraucht wird. Die Kraft wirkt bald an der Spindel, bald an der Mutter, wobei die Windungen der einen auf den Windungen der anderen wie auf einer schiefen Ebene auf- oder niedergleiten. Durch jede volle Umdrehung wird die Last um die Höhe eines Schraubenganges gehoben. Wirkt nun die Kraft P horizontal am Umfange der Schraube, also parallel zum Halbmesser r des Grundkreises, so ist, da hier wieder der Fall 2. des §. 34 eintritt, $P : Q = h : b = h : 2r\pi$. Um die Wirkung zu erhöhen, läßt man die Kraft nicht unmittelbar am Umfange der Schraube, sondern an einem größeren Hebelsarme R wirken. Dann ist $P : Q = h : 2R\pi$, weil nach den Gesetzen des Hebels $P : Q = r : R$.

Anmerkung. Man habe noch einmal einen Hebel, an welchem eine Kraft p der Last q das Gleichgewicht hält. Wird die Kraft p im Geringsten vermehrt, so erfolgt eine Störung des Gleichgewichts. Der Hebel geräth in Bewegung, wobei die Angriffspunkte der Kraft und der Last die in der Figur angedeuteten Bogen beschreiben, welche sich gewiß zu einander verhalten, wie die Längen der Hebelsarme. Also $pp' : qq' = cp : cq$. Nun ist aber bekanntlich auch $q : p = cp : cq$. Aus diesen beiden Proportionen folgt ohne Weiteres $q : p = pp' : qq'$ oder $p \cdot pp' = q \cdot qq'$, in Worten: das Product aus der Kraft in den Weg der Kraft ist gleich dem Producte aus der Last in den Weg der Last. Diese Producte heißen mechanische Momente im Gegensatze zu den Producten aus den Kräften in die Hebelsarme, welche statische Momente genannt werden.



Obgleich man mit der geringsten Kraft die größte Last heben kann, wenn nur der Hebelsarm der Kraft gehörig verlängert wird, so kann dabei doch von einem eigentlichen Gewinne an Kraft nicht die Rede sein, weil zufolge des Vorhergehenden die Kraft einen sehr gro-

Digitized by Google

ßen Weg zurücklegen muß, um die Last auf eine sehr kleine Höhe zu heben. Dies gilt im Grunde von allen Maschinen, wie außerordentlich auch sonst ihre Wirkungen sein mögen. Was auf der einen Seite an Kraft gewonnen wird, geht auf der anderen an Zeit verloren.

Viertes Kapitel.

Vom Gleichgewichte der Theilchen fester Körper unter einander.

37. Zufolge unserer Betrachtungen über die Bildung der Materie wissen wir, daß letztere auf einem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion beruht. Dieses Gleichgewicht kann auf mannigfache Weise gestört werden, wobei zugleich die Elemente oder Molekel der Körper eine Veränderung in ihrer Lage erfahren. Ueberschreitet die Störung eine gewisse Grenze nicht, so kehren die Molekel in ihre ursprüngliche Lage zurück, worin eben die Elasticität der Materie besteht. Man kann von den meisten Körpern behaupten, daß sie innerhalb gewisser Grenzen vollkommen elastisch sind, welche freilich für manche Körper so eng sind, daß sie der Wahrnehmung entgehen. Versuche lassen sich in dieser Hinsicht mit Metalldrähten anstellen, indem man sie entweder horizontal oder vertical an einem Ende befestigt und am anderen mit Gewichten beschwert. Die Verlängerung, welche die Drähte hierdurch erleiden, ist immer der ziehenden Gewalt proportional.

Wird die Elasticitätsgrenze überschritten, so ordnen sich die Theilchen entweder zu einem neuen Gleichgewichtszustande, wie man häufig bei Metallen beobachten kann, oder sie trennen sich von einander. Im ersten Falle sind die Körper dehnbar, im zweiten spröde. Außerdem nennt man einen Körper hart, wenn eine große Kraft nöthig ist, um eine bleibende Formveränderung an ihm hervorzubringen, dagegen weich, wenn sich seine Theile leicht verschieben lassen. Dehnbarkeit, Sprödigkeit, Härte und Weichheit hängen sehr von dem Einflusse der Wärme ab, welchen wir jetzt noch nicht näher berücksichtigen können.

38. Der Widerstand, welchen ein Körper der Trennung seiner Theile entgegensetzt, heißt seine Festigkeit.

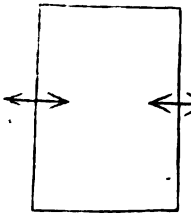
Digitized by Google

Man habe einen Körper, der vertical an seinem oberen Ende befestigt, an seinem unteren aber durch ein Gewicht belastet ist. Durch den Zug des Gewichts müssen sich seine Molekel eine Spannung gefallen lassen, wodurch sie von einander entfernt werden. Mit dieser Spannung ist aber unmittelbar das Streben der Molekel verbunden, in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren. Da die Spannung dem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion zuwider geschieht, so müssen die Molekel einen Widerstand leisten, der allmälig mit ihrer Entfernung von einander wächst. Denn wir wissen: die Nothwendigkeit, daß die Elemente oder Molekel so tief in einander seien, als ihrem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion entspricht, wird um so größer, je weiter sie davon abweichen. Dies hat aber seine Grenze; sobald dieselbe erreicht ist, erfolgt die Trennung plötzlich.

Den eben besprochenen Widerstand, welchen die starre Materie dem Zerreißen entgegensetzt, nennt man gewöhnlich die absolute Festigkeit. Man erkennt leicht, daß dieselbe vom Querschnitt des zu zerreißenden Körpers abhängt. Bezeichnet das Gewicht w die Festigkeit eines Querschnitts von 1 Quadratcentimeter und W die eines Querschnitts von n Quadratcentimeter bei einem Körper von derselben Materie, so ist allgemein $W = w.n$, da $W : w = n : 1$.

Will man die Festigkeit verschiedenartiger Körper mit einander vergleichen, so muß man sie natürlich auf denselben Querschnitt reduciren.

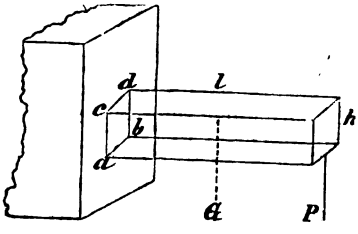
39. Wird ein Körper, der auf einer festen Unterlage steht, von oben belastet, so müssen seine Molekel in Folge des Druckes von Schicht zu Schicht tiefer in einander eindringen. Dies ist ebenfalls ihrem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion entgegen: wie vorher die Attraction, so muß jetzt die Repulsion wachsen, vermöge deren die Molekel wieder von einander entfernt werden. Nun kann aber blos nach den Seiten des Körpers hin die Repulsion frei wirken. Während also durch den Druck die Länge des Körpers abnimmt, muß gleichzeitig wegen der Repulsion seine Dicke zunehmen. Ist aber der Körper hohl, so kann die Repulsion nach zwei entgegengesetzten Richtungen frei wirken, nämlich sowohl nach der Außen-, als auch gegen die Innenseite des Körpers, wie die Pfeile in der Figur andeuten. Indem die Molekel nach entgegengesetzten Seiten zum Theil aus einander treten, entsteht ein neues Gleichgewicht der Attraction und Repulsion, in sofern der Druck von oben nicht allzugroß wird. Man wird hieraus erkennen, daß hohle Körper



Digitized by Google

unter sonst gleichen Umständen bei Weitem weniger der Gefahr des Zerdrückens ausgesetzt sind, als solide von demselben Material. Bei letzteren drängen die Molekel im Inneren wegen der zwischen ihnen entstehenden Repulsion mit ungewöhnlicher Gewalt nach Außen, was bei ersteren nicht so stattfinden kann. Daher auch die außerordentliche Festigkeit hohler metallener Säulen. Es bietet sich hier Gelegenheit, die weise Oekonomie der Natur zu bewundern, mit welcher sie bei Bildung der Knochen, Halme und Stängel zu Werke geht, indem sie mit der kleinsten Menge von Material doch die möglich größte Festigkeit erzielt. Uebrigens muß die zum Zerdrücken nöthige Kraft um so größer sein, je größer der Querschnitt und zwar, bei gleicher Größe desselben, je kleiner sein Umfang ist. Daher werden Körper, deren Querschnitt ein Quadrat ist, bei denen also die Wirkung des Drucks nach den verschiedenen Seiten hin als gleich anzunehmen ist, unter sonst gleichen Umständen mehr aushalten, als solche, deren Querschnitt ein Rechteck von gleichem Inhalte ist. Auch vermindert sich der Widerstand des Körpers mit zunehmender Höhe.

40. Man habe nun einen Körper, der horizontal an einem Ende befestigt, am anderen aber durch ein Gewicht beschwert ist. Es rage z. B. ein rechtwinkliges Parallelopiped aus einer Vermauerung hervor. Hängt nun an seinem Ende ein Gewicht P vertical herab, so sieht man wohl, daß sich der Körper bei hinreichender Größe von P biegen muß, und zwar so, daß die Molekel an seiner oberen Fläche gedehnt und deshalb von einander entfernt, dagegen die an der unteren in einander gedrückt werden. Hiernach nimmt man der Wahrscheinlichkeit gemäß an, daß zwischen beiden Flächen eine Schicht vorhanden sei, deren Molekel weder die eine, noch die andere Einwirkung erfahren. In unserem Falle wird diese Schicht in der Mitte der Höhe des Körpers liegen.



Erfolgt ein Zerbrechen, so wird dies, falls der Körper von gleichförmiger Dichte ist, nur da geschehen, wo er aus der Mauer hervorragt. Denn hier hat die Last P das größte Moment und das ganze Gewicht des Körpers wirkt mit, um die Theilchen zu trennen. Ist die Breite des senkrechten Querschnitts abcd — b Centimeter, seine Höhe — h Centimeter, so hat man nach §. 38 für seine absolute Festigkeit w.b. h, die man sich im Schwerpunkt des

Digitized by Google

Querschnitts vereinigt denken kann. Das Gewicht des Parallelopipeds sei — G und seine Länge — l. Nimmt man nun auf die Biegung keine Rücksicht, so ist für den Moment des Zerbrechens in Beziehung auf die Drehungsare a b nach den Gesetzen des Hebels

$$P.l + G.\,{}^1/_2\,l = w.bh.\frac{h}{2},$$

woraus sofort folgt $P + {}^1/_2\,G = \frac{w}{2}\cdot\frac{bh^2}{l}$.

$P + \frac{G}{2}$ ist nämlich die Kraft, welche in diesem Falle mit der Festigkeit des Körpers im Gleichgewichte sein muß. Bezeichnet man sie durch R, so ist also $R = \frac{w}{2}\cdot\frac{bh^2}{l}$.

Den Widerstand, welchen ein Körper gegen das Zerbrechen leistet, nennt man seine relative Festigkeit, während die in §. 39 besprochene gewöhnlich die rückwirkende genannt wird.

Werden bei einem anderen Körper von derselben Materie die ähnlichen Größen durch R', b', h', l' bezeichnet, so hat man

$$R : R' = \frac{bh^2}{l} : \frac{b'h'^2}{l'} \text{ und } R = \frac{R'\,l'}{b'h'^2}\cdot\frac{bh^2}{l}.$$

Ist $\frac{R'\,l'}{b'h'^2} = p$ aus Versuchen bekannt, so ist $R = p.\frac{bh^2}{l}$ die relative Festigkeit und zugleich die ungefähre Tragfähigkeit eines anderen Körpers von derselben Materie. Man sieht also, daß sie der Breite und dem Quadrate der Höhe gerade und der Länge des Körpers umgekehrt proportional ist. —

41. Wird ein Körper, der an einem seiner Enden befestigt ist, am anderen durch irgend eine Kraft gedreht, so müssen sich die in gerader Linie liegenden Theilchen von einander entfernen, indem sie eine Art Schraubenlinie bilden. Der Winkel, um welchen die Theilchen gedreht werden, ist um so größer, je weiter sie vom festen Ende abstehen. Hinsichtlich der Kraft, mit welcher die Theilchen in ihre frühere Lage zurückstreben, kann man Versuche anstellen, wenn man einen Metalldraht vertical befestigt und an seinem unteren Ende mit einem Gewichte beschwert. Wird dieses Gewicht um die Are des Drahtes gedreht, so erleidet derselbe eine Windung. Sobald man aber das Gewicht wieder frei läßt, entsteht durch das Bestreben der Theilchen, in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren, eine Reihe von Schwingungen, die bis zum Momente des Gleichgewichts immer kleiner werden. Mittelst dieser Schwingungen läßt sich nach den Gesetzen des

Digitized by Google

Pendels die Kraft berechnen, mit welcher der gewundene Draht in seine Gleichgewichtslage zurückstrebt. Coulomb hat durch seine Versuche diese Kraft stets der Größe der Drehung proportional gefunden.

In Bezug auf die Festigkeit und Elasticitätsgrenze verschiedener Körper haben Muschenbroek, Eytelwein, Gerstner, Young und Andere viele Versuche angestellt.

Immer zeigt die Erfahrung, daß die Theilchen der Körper anfänglich der einwirkenden Gewalt etwas nachgeben, dann einen allmälig wachsenden Widerstand leisten, der ein Maximum erreicht, welches nur mit Gefahr einer sofortigen Trennung überschritten werden kann.

Digitized by Google

Dritter Abschnitt.

Von den Bewegungsgesetzen der Körper, namentlich fester.

Erstes Kapitel.

Bewegung überhaupt und Mittheilung derselben.

42. Ein Körper ist in Bewegung, wenn er allmälig verschiedene Stellen des Raumes einnimmt; er ist in Ruhe, wenn dies nicht stattfindet. Alle Bewegung ist nothwendig relativ: denn ob ein Körper in Bewegung oder Ruhe ist, können wir nur dadurch beurtheilen, daß wir ihn mit anderen vergleichen, da der Raum unbegrenzt und überall derselbe ist. Bewegung als solche und als unabhängig betrachtet ist lediglich eine Sache des vergleichenden Vorstellens. Die Veränderung, welche wir bei ihr beobachten, liegt nur darin, daß der bewegte Körper immer von Neuem andere Raumstellen einnimmt, welche sämmtlich zusammengefaßt werden müssen, um die Vorstellung der Bewegung zu erhalten. Der Körper selbst aber erleidet dadurch keine Veränderung: denn er ist in jeder Stelle seines Wegs sich selbst gleich, sobald wir von sonstigen Einwirkungen absehen.

43. Bei jeder Bewegung sind zwei Dinge als gleich wesentlich zu berücksichtigen: Richtung und Geschwindigkeit.

Die einfachste aller Bewegungen, welche ein Körper annehmen kann, ist die geradlinige, bei welcher er in gleichen Zeiten gleiche Räume durchläuft, wo also das Verhältniß zwischen Raum und Zeit immer dasselbe bleibt. Diese gleichförmige Bewegung findet ihre Darstellung in der Formel $s = ct$, wenn s den in der Zeit t durchlaufenen Raum und c die Intensität der Bewegung, d. h. ihre Geschwin-

Digitized by Google

digkeit bezeichnet. Die Geschwindigkeit ist also der Exponent des Verhältnisses zwischen Raum und Zeit: $\frac{s}{t} = c$, und durch die Größe dieses Exponenten unterscheiden sich die verschiedenen gleichförmigen Bewegungen von einander. Die Bewegung zerfällt also ihrem Begriffe nach in die zwei Factoren: Geschwindigkeit und Zeit.

Doch ist die Geschwindigkeit nichts von der Bewegung selbst Verschiedenes, sondern selbst schon Bewegung, indem man darunter gewöhnlich den Raum versteht, der von dem bewegten Körper in der Einheit der Zeit beschrieben wird ($s = ct$, $t = 1 : s = c$).

Die Zeit ist aber im eigentlichen Sinne ein Multiplicator der Geschwindigkeit, insofern sie angiebt, wie oft jener in der Einheit der Zeit beschriebene Raum (d. h. die Geschwindigkeit) bei einer gegebenen gleichförmigen Bewegung wiederholt wird. Denn die gleichförmige Bewegung wiederholt sich unaufhörlich auf dieselbe Weise, wenn von fremden Einwirkungen abgesehen wird. Die Wiederholung ist aber hier eine Vervielfältigung dessen, was in der Einheit der Zeit jedesmal geschieht. Die Zeit t, als Multiplicator, zeigt nun die Menge der Wiederholungen an.

Ein Körper, welcher einmal eine gleichförmige Bewegung hat, muß sich fortwährend nach derselben Richtung und mit derselben Geschwindigkeit bewegen. Wäre dies nicht der Fall, so müßte eine Ursache vorhanden sein, welche entweder seine Richtung oder seine Geschwindigkeit, oder auch beides zugleich abänderte. Die Annahme, daß der Körper selbst in dieser Hinsicht eine Abänderung treffen könnte, würde widersprechend sein.

44. Um sich die richtige Ansicht über die Bewegung nicht zu verderben, muß man sich vor der Meinung hüten, als sei die Geschwindigkeit irgend Etwas in dem bewegten Körper, das ihn forttreibt und von einem ruhenden unterscheidet. Wäre wirklich die Geschwindigkeit ein Trieb, welcher den Körper innerlich nöthigt zum fortgehenden Wechsel der Raumstellen, so müßte derselbe alle künftigen Fortrückungen, wie sie durch die gerade Linie der Bahn bestimmt sind, im Voraus in sich enthalten. Dieser Trieb würde theilweise befriedigt durch jeden Theil der wirklich vollzogenen Bewegung. Nun kann aber nimmermehr ein Trieb, welcher zum Theil befriedigt worden, gleich sein ihm selbst vor der Befriedigung, sondern er ist nothwendig schwächer um das Quantum, welches von ihm befriedigt wurde. Die Bewegung müßte demgemäß immer langsamer werden, sie könnte nicht mit immer gleicher Intensität, die wir Geschwindigkeit

Digitized by Google

nennen, fortgehen. Das heißt mit anderen Worten: die gleichförmige Bewegung wäre unter dieſer Vorausſetzung unmöglich.

Daher muß ein Körper, welcher einmal eine gleichförmige Bewegung hat, in derſelben Richtung mit derſelben Geſchwindigkeit in's Unendliche fortgehen, falls ſich dieſer Bewegung keine Hinderniſſe entgegenſtellen.

Wie eine Urſache vorhanden ſein muß, um eine gewiſſe Bewegung in Beziehung auf Richtung oder Geſchwindigkeit abzuändern, ſo iſt auch eine ſolche nöthig, wenn ein Körper, der ſich einmal in Ruhe befindet, in Bewegung übergehen ſoll. Außerdem iſt den Gegenſtänden im Raume die Bewegung vollkommen eben ſo natürlich als die Ruhe. Auch kann es eine urſprüngliche Bewegung geben. Die Elemente der Materie könnten urſprünglich ebenſowohl in Bewegung, als in Ruhe ſein; eins iſt ſo möglich, als das andere, beides aber den Elementen ſelbſt gleich zufällig. Doch iſt unter einer Menge von gegenſeitig unabhängigen Körpern allemal Bewegung als ihr urſprüngliches Raumverhältniß zu erwarten, Ruhe dagegen ſehr unwahrſcheinlich, weil ſie unter den unzähligen Möglichkeiten größerer oder geringerer Geſchwindigkeit nur ein einziger Fall, nämlich derjenige iſt, in welchem die Geſchwindigkeit gerade = 0 ſein würde.

45. Bisher haben wir die Bewegung als unabhängig, d. h. ohne Rückſicht auf die Qualität des Bewegten betrachtet, wie es auch ſein muß. Bei der unabhängigen Bewegung, welche auch urſprünglich ſein kann, iſt die beſondere Beſchaffenheit des bewegten Körpers ohne Einfluß, weil der Körper in jedem Orte ſeiner Bahn ſich ſelbſt gleich bleibt und alle ſeine Eigenſchaften unverſehrt beibehält. Er wechſelt nur ſeinen Ort im Raume, worin die ganze Veränderung während einer ſolchen Bewegung beſteht. Anders verhält ſich dies bei einer Bewegung, welche aus einer Wechſelwirkung hervorgeht, wie beim Stoße körperlicher Maſſen. Wenn zwei Maſſen einander ſtoßen, ſo iſt das Innere derſelben nicht gleichgültig, ſondern es liegt darin der beſtimmende Grund, warum die Bewegung nach ſolchen oder anderen Geſetzen geſchieht oder ſich mittheilt. Härtere, weichere, zähere, biegſamere, mehr oder weniger flüſſige Körper machen hier Unterſchiede, auf welche freilich in den gewöhnlichen Abſtractionen, wo nur von vollkommen harten, elaſtiſchen und flüſſigen Körpern die Rede iſt, keine Rückſicht genommen wird.

Wir wiſſen, daß die Materie auf einem Gleichgewichte der Attraction und Repulſion beruht, und daß ſich die Elemente während ihrer Verbindung mit einander in beſtimmten inneren Zuſtänden be-

Digitized by Google

finden, wovon die äußere, räumliche Lage der Elemente nur eine nothwendige Folge ist. Haben sich nun einmal gewisse Elemente zu einem Körper mit einander verbunden, so ist unter den gewöhnlichen Verhältnissen die Möglichkeit, noch neue innere Bestimmungen anzunehmen, in so hohem Grade beschränkt, daß freilich die eigenthümliche Natur der Materien, welche einander im Stoße begegnen, gänzlich verlarvt zu sein scheint. Man weiß auch, daß aus diesem Grunde die Chemie das Feuer und mancherlei Künste anwenden muß, um die Elemente wieder aufzuschließen oder gleichsam für einander zu eröffnen, was noch außerdem in gar vielen Fällen lange Zeit erfordert.

Im Stoße der Massen haben wir ein Phänomen, welches zwischen der Adhäsion und chemischen Einwirkung in der Mitte liegt.

46. Wenn zwei Massen zusammentreffen, so kann der eigentliche Stoß zwischen ihnen nicht eher beginnen, als bis eine der anderen den Raum streitig macht, also wenn sie sich gegenseitig drücken und in einander einzudringen suchen. Der Anfang dieses Eindringens kann nun mit einer Anziehung verbunden sein, und wenn die unmittelbar in Berührung getretenen Theile der einen Masse als Staubtheilchen frei schwebten, so könnten sie der anderen Masse adhäriren, gerade so wie aufsteigende Staubtheilchen sich an andere Körper anzuhängen pflegen (§. 18). Die Wirkung der Adhäsion kann allerdings nicht weit fortschreiten, weil dadurch die schon vorhandenen inneren Zustände, auf denen die ganze Constitution der Materie beruht, müßten abgeändert werden. Die Hauptsache ist vielmehr diese, daß in dem Augenblick, in welchem die Massen einander den Raum streitig machen, sich das in ihnen vorhandene Gleichgewicht der Attraction und Repulsion oder die ursprünglich der Materie, als solcher, eigene Spannkraft widersetzt. Was nun aus diesem Widerstreite wird, ist nach den Umständen verschieden. Die Körper können zerbrechen, sich biegen, sich erhitzen u. s. w. Jede Bewegung aber, welche daraus entspringt, wird durch ein Verhältniß der Massen zu einander bestimmt, welches seinen letzten Grund im Inneren, in der ursprünglichen Qualität der Elemente hat, und niemals kann es dabei blos auf die Masse, als solche, ankommen.

In dem Moment nun, wo die Massen einander den Raum streitig machen, wird auch die Differenz der Geschwindigkeiten, mit welchen sie sich begegneten, ausgeglichen. Alsdann muß die Materie, deren innere Constitution dabei leidet, sich in so weit wieder herstellen, als dies nicht schon durch völlige Trennung der früher verbun-

Digitized by Google

denen oder durch Einschiebung neuer Theile unmöglich geworden ist. Die Geschwindigkeiten müssen sich ausgleichen, aber nicht plötzlich, sondern allmälig von einem Theile der Masse fortschreitend zum anderen. Hierher gehört z. B. die Erscheinung, daß eine Zimmerthüre durch einen sanften Stoß zugemacht werden kann, während eine darauf abgeschossene Flintenkugel ihr kaum eine Bewegung ertheilt; daß ein Faden reißt, an welchem man einen Körper rasch erheben will, während er ganz bleibt, wenn man den Körper allmälig in Bewegung setzt. Ebenso das Durchlöchern einer Glasscheibe durch einen Schuß, während sie durch einen einfachen Stoß zerschmettert wird. Das Pulver theilt nämlich der Kugel eine solche Geschwindigkeit mit, daß die Glasmolecüle, welche sie trifft, rasch fortgerissen werden, ehe sie noch diese Bewegung auf die zur Seite liegenden Theilchen fortpflanzen konnten. Ganz Aehnliches gilt in den anderen Beispielen.

Indem die eine Masse an Geschwindigkeit verliert, weil die zuerst anstoßenden Theilchen sonst zu dicht auf die inneren gedrängt würden, erzeugt sich dagegen Geschwindigkeit in der anderen, weil auch ihre Elemente sonst entweder verdichtet oder getrennt werden würden. Dies geht so fort durch alle Schichten der Körper hin, bis die Geschwindigkeiten aller Theile gleich sind, oder bis die Körper, falls der Stoß nicht central ist, einander durch ihre Bewegung nicht mehr hindern. Darauf folgt Herstellung, so weit sie noch möglich ist, in Ansehung derjenigen Verdichtung oder Spannung, welche nicht etwa schon während des Stoßes (vielleicht durch eine Verschiebung der Theilchen) war vermieden worden.

47. Man erkennt aus dem Vorhergehenden leicht, daß beim Stoße zweier oder mehrerer Körper sowohl die Masse, als auch die Geschwindigkeit, und zwar beide ebenmäßig, zu berücksichtigen sind. Beide bilden die Factoren eines Products, welches man Größe der Bewegung, auch wohl bewegende Kraft nennt.

Man habe nun mehrere Körper, welche an Masse verschieden und in Ruhe befindlich sind. Wird jeder derselben insbesondere von einem Körper, dessen Masse M ist, mit der Geschwindigkeit C getroffen, so muß sich die letztere nach dem Obigen in dem gestoßenen Körper vertheilen, bis beide eine gemeinschaftliche Geschwindigkeit erlangt haben, welche von der Größe der Masse des letzteren Körpers abhängt. Da die Einwirkung, welche zwischen beiden Körpern während des Stoßes stattfindet, von den unmittelbar getroffenen Theilchen des zweiten Körpers durch alle Schichten seiner Masse von Theilchen zu Theilchen sich fortpflanzen muß, so ist klar, daß die

Digitized by Google

Geſchwindigkeit des getroffenen Körpers nach dem Stoße um ſo kleiner ausfällt, je größer ſeine Maſſe iſt. Das heißt: Ein und derſelbe bewegte Körper theilt anderen in Ruhe befindlichen und an Maſſe verſchiedenen Körpern Geſchwindigkeiten mit, welche im umgekehrten Verhältniſſe der Maſſen ſtehen.

Aus dieſem Satze folgt, daß zwei Körper, die keine merkliche Elaſticität beſitzen, ſich in Ruhe bringen, wenn ſie ſich in entgegengeſetzten Richtungen ſtoßen und ihre Maſſen im umgekehrten Verhältniſſe der Geſchwindigkeiten ſtehen, womit ſie ſich begegneten. Die Bedingung des Gleichgewichts beim Stoße zweier Körper iſt daher die Gleichheit ihrer Größen der Bewegung, alſo die Gleichung $mc = m'c'$, wenn m und m' ihre Maſſen und c, c' ihre Geſchwindigkeiten bezeichnen. Und umgekehrt ſind die Producte der Maſſen und Geſchwindigkeiten gleich, ſobald im Stoße zweier Maſſen Gleichgewicht ſtattfindet.

Es wird hierbei vorausgeſetzt, daß der Stoß ein centraler, d. h. ein ſolcher iſt, bei welchem die Richtung der Bewegung der Körper durch den Schwerpunkt derſelben geht.

Wenn aber $mc > m'c'$ iſt, ſo bleibt von der Größe der Bewegung beider Körper nach dem Stoße nur noch $mc - m'c'$ übrig, in Folge deſſen ſich die Maſſe $m + m'$ nach der Richtung, welche m vor dem Stoße hatte, fortbewegen muß. Nennt man nun die gemeinſchaftliche Geſchwindigkeit beider Körper nach dem Stoße x, ſo hat man

$$mc - m'c' = x(m + m') \text{ und}$$

$$x = \frac{mc - m'c'}{m + m'} \quad (1)$$

Bewegen ſich beide Maſſen in derſelben Richtung, ſo müſſen ſie ſich wegen des Unterſchiedes ihrer Geſchwindigkeiten c und c' zuſammendrücken, indem ſie ſich gegen einander ſtützen. Während dieſes Zuſammendrückens wird (unſerer obigen Darſtellung gemäß) die Geſchwindigkeit der anſtoßenden Maſſe m ab-, die der geſtoßenen m' aber zunehmen, bis beide Geſchwindigkeiten gleich geworden ſind. Haben nun dieſe Körper, wie wir vorausgeſetzt, keine merkliche Elaſticität, ſo hören ſie in dem Augenblick, wo ihre Geſchwindigkeiten gleich geworden ſind, auf, eine gegenſeitige Einwirkung auf einander zu haben, indem ſie hinter einander bleiben und ſich mit der erlangten gemeinſchaftlichen Geſchwindigkeit fortbewegen.

Nennt man wieder die gemeinſchaftliche Geſchwindigkeit beider

Digitized by Google

Körper nach dem Stoße x, so hat während deſſelben m die Geſchwindigkeit $c - x$ verloren und m' die Geſchwindigkeit $x - c'$ gewonnen. Wenn die beiden Maſſen mit dieſen Geſchwindigkeiten in entgegengeſetzten Richtungen einander begegneten, ſo müßten ſie ſich im Gleichgewichte halten. Daher beſteht die Gleichung

$$m(c - x) = m'(x - c'),$$

woraus ſofort

$$x = \frac{mc + m'c'}{m + m'} \quad (2)$$

als Werth der gemeinſchaftlichen Geſchwindigkeit nach dem Stoße hervorgeht.

Iſt m' vor dem Stoße in Ruhe, hinſichtlich ſeiner Dichtigkeit ſehr groß und mit m verglichen faſt unendlich groß, ſo kann man $x = 0$ ſetzen. Dann wird der nicht merklich elaſtiſche Körper m durch den Stoß gegen die ſo beſchaffene Maſſe m' zur Ruhe gebracht werden, indem ſelbige ein feſtes Hinderniß abgiebt. Nämlich die Geſchwindigkeit, welche ſich während der Einwirkung von m auf m' in den unmittelbar geſtoßenen Theilchen der letzteren Maſſe erzeugt, wird durch ihre allzugroße Vertheilung in den übrigen Schichten dieſer Maſſe ganz unmerklich. Aus dieſem Grunde iſt auch die gemeinſchaftliche Geſchwindigkeit x beider Maſſen nach dem Stoße $= 0$ zu ſetzen.

48. Sind aber die beiden Körper, welche einander im Stoße begegnen, in einem höheren Grade und zwar innerhalb gewiſſer Grenzen vollkommen elaſtiſch, ſo ſtreben ſie auch ihre natürliche Geſtalt wieder vollſtändig anzunehmen. Indem ſie nun zu dieſer zurückkommen und ſich noch immer gegen einander ſtemmen, nimmt die Geſchwindigkeit der einen Maſſe m fortwährend ab, die der anderen m' dagegen zu. Zuletzt kommt ein Augenblick, in welchem ſich die Körper trennen, und dies iſt das Ende des Stoßes. In dieſem Falle kann man alſo den Stoß in zwei Theile zerlegen. Der erſte Theil erſtreckt ſich bis zum Moment der größten Zuſammendrückung, worauf der zweite folgt, indem nun die Körper zurückſpringen in ihre urſprüngliche Form mit einer Gewalt, welche der Größe des gegenſeitigen Druckes entſpricht.

Der erſte Theil des Stoßes gleicht ganz dem Stoße unmerklich elaſtiſcher Körper, ſo daß die Verminderung der Geſchwindigkeit von m gleich $c - x$ und die Vermehrung der m' gleich $x - c'$ iſt, falls beide Maſſen ſich in derſelben Richtung bewegen. Die oben beſtimmte Geſchwindigkeit (2) iſt dann auch diejenige, welche ſie im Augenblick der größten Zuſammendrückung gemeinſchaftlich haben. Sind nun die

Digitized by Google

Massen völlig elastisch, so erleidet m im zweiten Theile des Stoßes, wo sie in ihre ursprüngliche Gestalt zurückspringen, von m′, — welches der Richtung der Bewegung entgegen auf m wirkt, indem es seine frühere Gestalt wieder annimmt, — eine zweite Verminderung der Geschwindigkeit, die der ersten (c − x) als gleich zu betrachten ist. Daher wird seine Geschwindigkeit am Ende des ganzen Stoßes noch c − 2 (c − x) = 2 x − c sein. Zu gleicher Zeit erleidet m′ eine zweite Vermehrung der Geschwindigkeit, die von m herrührt, indem dieses in der Richtung der Bewegung beider Massen in seine ursprüngliche Form zurückkehrt. Diese zweite Vermehrung der Geschwindigkeit von m′ ist unter Voraussetzung vollkommener Elasticität (wenigstens innerhalb gewisser Grenzen) wieder gleich der ersten, also = x − c′ und daher die Endgeschwindigkeit c′ + 2 (x − c′) = 2 x − c′.

Nennt man nun C und C′ die Geschwindigkeiten von m und m′ nach dem Stoße, so hat man also

$$C = 2x - c, \quad C' = 2x - c',$$

wo der Werth von x immer durch die Formel (2) in §. 47 bestimmt ist.

Zieht man die eben gefundenen Werthe der Geschwindigkeiten von m und m′ nach dem Stoße von einander ab, so erhält man

$$C - C' = c' - c,$$

woraus folgt, daß die relative Geschwindigkeit beider Massen nach dem Stoße gleich ist der relativen Geschwindigkeit vor dem Stoße, jedoch der Richtung nach entgegengesetzt, wie es die Natur der Sache mit sich bringt.

Betrachtet man wieder die Masse m′ wegen ihrer Dichtigkeit im Verhältnisse zu m als außerordentlich groß und in Ruhe befindlich (also c′ = 0), so ist auch wieder x = 0, aber C = − c, d. h. wenn eine vollkommen elastische Kugel auf ein festes Hinderniß trifft, so prallt sie vermöge der elastischen Rückwirkung mit einer Geschwindigkeit ab, die derjenigen, welche sie vor dem Stoße hatte, gleich und entgegengesetzt ist.

Setzt man m = m′, so erhält man aus der Formel

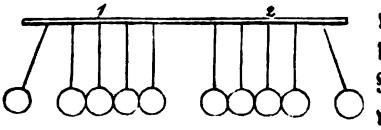
$x = \frac{mc + m'c}{m + m'} : x = \frac{c + c'}{2}$; ferner $C = 2x - c =$ $(c + c') - c = c'$, $C' = 2x - c' = (c + c') - c' = c$.

Bei dem Stoße zweier völlig elastischer Kugeln von gleicher Masse entsteht daher ein Umtausch der Geschwindigkeiten, und wenn eine derselben vor dem Stoße in Ruhe ist, so bleibt die andere nach

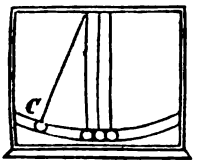
Digitized by Google

dem Stoße in Ruhe und die erstere erhält die ursprüngliche Geschwindigkeit der zweiten.

Dieses Resultat läßt sich auf eine beliebige Anzahl von Kugeln ausdehnen. Man habe eine Reihe neben einander liegender Kugeln von gleicher Masse und vollkommener Elasticität, deren Mittelpunkte in einer Geraden liegen. Wird nun diese Reihe von einer elastischen Kugel gestoßen, die jeder einzelnen an Masse gleich und in der Richtung der Mittelpunkte in Bewegung ist, so vereinigt sich dieselbe mit der Reihe, die in Ruhe bleibt, bis auf die letzte, welche sich allein mit der Geschwindigkeit der anstoßenden Kugel fortbewegt.



49. Um die Uebereinstimmung dieser Gesetze mit der Erfahrung genauer zu prüfen, kann man sich auch der sogenannten Stoßmaschine von s'Gravesande und Rollet bedienen. Dieselbe besteht im Wesentlichen aus mehreren an gleich langen Fäden hängenden Kugeln, die einander so berühren, daß ihre Mittelpunkte in derselben Höhe liegen. Hinter ihnen befindet sich ein Kreisbogen AB, der von seinem tiefsten Punkte an zu beiden Seiten aufwärts in Grade getheilt ist.



Wird eine dieser Kugeln bis C gehoben und dann frei gelassen, so erlangt sie eine Geschwindigkeit, die sich bestimmen läßt und am Gradbogen angemerkt werden kann. Wählt man Kugeln, die von einer Seite gegen die andere beständig an Masse zunehmen, und ertheilt man der größten von ihnen eine gewisse Geschwindigkeit, so muß die zweite durch den Stoß derselben schon eine größere Geschwindigkeit erlangen, die dritte eine noch größere, u. s. f. bis zur letzten und kleinsten, welche die größte Geschwindigkeit erhalten wird. Dies geht klar hervor aus dem Satze des §. 47.

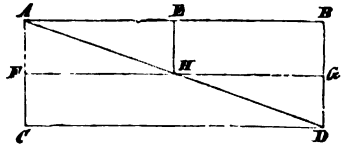
Zu Versuchen über den Stoß fester Körper von sehr geringer Elasticität nimmt man Massen aus trocknem Thon oder Mehlteig, für elastische aber Guajakholz oder Elfenbein (z. B. Billardkugeln).

50. Wird ein Körper durch zwei Ursachen zur Bewegung veranlaßt, und zwar so, daß ihn die eine für sich allein von A nach B, die andere aber allein von A nach C treibt: so muß er unter gleichzeitiger Einwirkung beider Ursachen die Diagonale des Parallelogramms durchlaufen, welches sich aus den geraden Linien AB und AC construiren läßt. Denn der Körper kann nicht dem Antrieb der

Digitized by Google

einen oder anderen Urſache allein folgen, da beide gleichzeitig auf ihn wirken, ſondern er muß eine mittlere Richtung einſchlagen, die aus den Richtungen der Linien AB und AC zuſammengeſetzt iſt und durch die Diagonale des Parallelogramms vorgeſtellt wird. Dies läßt ſich auf folgende Art einfach darthun.

Der Punkt A bewege ſich gleichförmig auf der Linie AB, ſo daß er in der Zeiteinheit von A nach B kommt. Während dieſer Zeit bewege ſich die Linie AB parallel mit ſich ſelbſt, ſo daß jeder Punkt derſelben gleichförmig einen Raum — AC durchläuft und ſie ſelbſt am Ende dieſer Zeit die Lage CD einnimmt. Dann hat der Punkt A die zwei Bewegungen AB und AC und er wird, vermöge derſelben, in der Zeiteinheit die Diagonale AD des Parallelogramms ABCD gleichförmig durchlaufen.



Da der Punkt A am Ende der Zeiteinheit in B und der Punkt B am Ende dieſer Zeit in D iſt, ſo wird auch der Punkt A am Ende der Zeiteinheit in D ſein. Nimmt man nun an, es habe der Punkt A im nten Theile der Zeiteinheit den Raum AE auf der Linie AB durchlaufen, ſo wird auch, wenn während dieſer Zeit die Linie AB in die Lage FG gekommen iſt, AF der nte Theil von AC ſein. Hieraus folgt AE : AB — AF : AC — AE : CD,

da AB — CD;

oder $$\frac{AE}{AB} = \frac{AF}{AC} = \frac{AE}{CD}.$$

Betrachtet man aber die Diagonale AD, welche die Linie FG im Punkte H ſchneidet, ſo hat man auch wegen der ähnlichen Dreiecke AFH und ACD:

$$AF : AC = FH : CD \text{ oder } \frac{AF}{AC} = \frac{FH}{CD}.$$

Da nun $\frac{AF}{AC} = \frac{AE}{CD}$, ſo iſt auch $\frac{FH}{CD} = \frac{AE}{CD}$, d. h. FH — AE, woraus hervorgeht, daß ſich der Punkt A am Ende jedes nten Theils der Zeiteinheit in einem Punkte H der Diagonale AD befindet.

Weil ferner in den angeführten ähnlichen Dreiecken

$$AH : AD = AF : AC$$

ſo folgt, daß der Punkt A die Diagonale AD des Parallelogramms ABCD gleichförmig durchläuft.

Digitized by Google

Zweites Kapitel.

Von der beſchleunigten Bewegung.

51. Wenn ſich das Verhältniß der durchlaufenen Räume zu den Zeiten, welche zu ihrer Beſchreibung verwendet werden, fortwährend ändert, ſo nennt man die Bewegung eine veränderliche. Nach der gleichförmigen Bewegung, welche wir ſchon betrachtet haben, iſt die einfachſte diejenige, bei welcher die Geſchwindigkeit in gleichen Zeiten um gleichviel zu- oder abnimmt, und die eben deshalb eine gleichförmig beſchleunigte oder verzögerte genannt wird. Da die Geſchwindigkeit von einem Zeittheilchen zum anderen beſtändig zu- oder abnimmt, ſo muß allerdings eine Urſache vorhanden ſein, welche dies bewirkt; und da die Zu- oder Abnahme gleichförmig geſchieht, ſo muß die Urſache auch immer auf dieſelbe Weiſe wirken. Eine ſolche bewegende Urſache nennt man eine beſtändige Kraft, eben weil ſie in gleichen Zeiten gleiche Geſchwindigkeiten hervorbringt.

Es ſei nun g der poſitive oder negative Zuwachs der Geſchwindigkeit in jeder Zeiteinheit. Hat alſo der bewegte Körper während der erſten Zeiteinheit die Geſchwindigkeit g erlangt, ſo muß er nach 2, 3, 4, 5, ... t Zeiteinheiten die Geſchwindigkeiten 2g, 3g, 4g, 5g, ...tg erhalten haben. Das heißt: bei der gleichförmig beſchleunigten Bewegung iſt die Geſchwindigkeit des bewegten Körpers der verfloſſenen Zeit proportional. Bezeichnet man daher durch c die Geſchwindigkeit, welche der Körper während der Zeit t erlangt hat, ſo iſt allgemein

$$c = g\,t. \qquad (1)$$

Den Ausdruck für den in der Zeit t zurückgelegten Weg s findet man leicht, wenn man ſich die gleichförmig beſchleunigte Bewegung auf folgende Weiſe in eine Reihe von einfach gleichförmigen Bewegungen zerlegt denkt.

Zu dieſem Ende ſei die Zeit t in eine beſtimmte Anzahl n gleicher Theile getheilt, deren jeder $= \tau$ ſein mag. Anſtatt nun anzunehmen, daß die bewegende Urſache ſtetig wirkt, ſtelle man ſich vor, ſie wirke ſtoßweiſe, ſo daß ſie am Anfange jedes Zeittheilchens dem Körper einen Zuwachs $p = \frac{c}{n}$ an Geſchwindigkeit ertheilt. Dann ſind die in den aufeinander folgenden einzelnen Zeittheilchen zurückgelegten Wege:

$$p\tau,\ 2p\tau,\ 3p\tau,\ 4p\tau,\ \ldots.\ np\tau.$$

Digitized by Google

Die Summe aller dieser Wege ist aber gleich dem Wege s, welchen der Körper in der Zeit t beschrieben hat. Daher

$$s = p\tau + 2p\tau + 3p\tau = 4p\tau + \ldots + np\tau$$
$$= p\tau\,(1+2+3+4+\ldots+n)$$

Da aber die Summe der eingeschlossenen arithmetischen Reihe $= (n+1)\frac{n}{2}$, so ist auch

$$s = p\tau \,.\, (n+1)\frac{n}{2} = \frac{n^2 p\tau}{2} + \frac{np\tau}{2}.$$

Und da ferner $np = c$ und $n\tau = t$, so hat man sofort

$$s = \frac{ct}{2} + \frac{ct}{2n} = \frac{ct}{2}\,(1 + \frac{1}{n}).$$

Man sieht nun leicht, daß der Bruch $\frac{1}{n}$ um so kleiner wird, je größer n ist, oder je schneller die Wirkungen der beschleunigenden Ursache auf einander folgen. Läßt man nun die zwischen jenen Wirkungen angenommenen Zwischenräume zusammenfallen, so verwandelt sich die fortgesetzte Folge von gleichförmigen Bewegungen in eine gleichförmig beschleunigte Bewegung und obiger Bruch wird $= 0$. Daher hat man

$$s = \frac{ct}{2}$$

oder zufolge der Gleichung (1) $s = \frac{gt^2}{2}$, (2)

woraus hervorgeht, daß der durchlaufene Raum dem Quadrate der verflossenen Zeit proportional ist.

Der Zuwachs g der Geschwindigkeit in jeder Zeiteinheit führt den Namen der Beschleunigung.

Aus der Formel $c = gt$ folgt, daß die Geschwindigkeit, welche der Körper am Ende der Zeit t erlangt hat, so beschaffen ist, daß er vermöge derselben allein in der Zeit t einen Raum $ct = gt^2$ gleichförmig beschreiben würde, der das Doppelte des Raumes ist, den er wirklich durchlaufen hat.

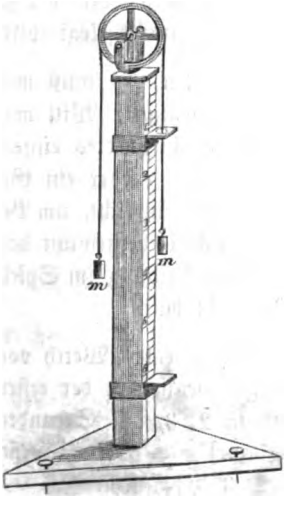
52. Alle Körper, die man schwer nennt, nehmen im leeren Raume eine gleichförmig beschleunigte Bewegung an. An demselben Orte ist die Geschwindigkeit g für alle dieselbe, so daß sie alle, vermöge einer und derselben Bewegung dieser Art, verticale gerade Linien beschreiben. Daraus folgt, daß an demselben Orte oder in nicht weit von einander entfernten Orten alle Körper gleich schwer sind. Dagegen ändert sich die Beschleunigung g, womit die Körper nach der Erde hin fallen, von einem Ort zu einem weit entfernten anderen,

Digitized by Google

und deshalb auch die Schwere. So wird sie gegen den Aequator der Erde hin kleiner, aber näher gegen die Pole größer.

Wir haben schon im §. 26 bemerkt, daß die bewegende Ursache, welche das freie Fallen der Körper zur Folge hat, Schwerkraft heißt, und daß man darunter die Anziehung versteht, welche die Erde auf alle Körper ausübt. Man nennt sie eine beständige Kraft, weil sie (wenigstens innerhalb gewisser Grenzen) in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeiten hervorbringt. Alle Erscheinungen der Schwere sind als ein Erfolg der gegenseitigen Anziehung der Erde und der fallenden Körper zu betrachten. Ob aber diese Anziehung von einer besonderen Kraft herrührt, durch welche die materiellen Theilchen aller Körper unmittelbar auf einander wirken, ist ein Punkt, auf den wir später zurückkommen werden. Für jetzt ist uns immer noch die Schwerkraft ein bloßer Name für eine unbekannte Ursache. Die Anziehung selbst aber, welche die gleichförmig beschleunigte Bewegung fallender Körper zur Folge hat, ist Thatsache.

53. Daß die Körper während ihres Falles nach der Erde hin Räume beschreiben, welche sich wie die Quadrate der Fallzeiten verhalten, läßt sich mittelst einer Vorrichtung nachweisen, die unter dem Namen der Atwood'schen Fallmaschine bekannt ist. Direct läßt sich obiges Gesetz durch den Versuch nicht darthun, weil die Geschwindigkeit, mit welcher die Körper gewöhnlich fallen, so rasch zunimmt, daß es unmöglich ist, die in gegebenen Zeiten durchlaufenen Räume genau zu bestimmen.



Im Wesentlichen besteht die genannte Maschine aus einer um ihre Axe leicht beweglichen Rolle, über deren Umfang eine Schnur geht, welche an ihren Enden gleiche Gewichte m trägt. Die Rolle ist an einer verticalen in Zolle eingetheilten Säule befestigt, an der man den Weg, den ein Gewicht zurücklegt, messen und mit der Zeit der Bewegung vergleichen kann. Legt man nun auf der einen Seite ein Uebergewicht auf, so wird das Gleichgewicht gestört, indem das Gewicht, welches die Zulage erhalten hat, fällt, das andere aber eben dadurch gehoben wird. Die Geschwindigkeit, mit welcher diese Bewegung geschieht, ist na-

Digitized by Google

türlich weit geringer als beim freien Falle, weil die auf das Uebergewicht wirkende Schwere nicht nur die Masse dieses Gewichts, sondern auch noch die Massen der übrigen Gewichte nebst der Rolle selbst in Bewegung zu setzen hat. Das Uebergewicht läßt sich nun leicht so wählen, daß das fallende Gewicht in der ersten Secunde einen bestimmten Weg, z. B. 1 Zoll zurücklegt. Dann zeigt sich an der Scala, daß es am Ende der zweiten Secunde 4 Zoll, am Ende der dritten Secunde 9 Zoll u. s. w. zurücklegt. Hieraus folgt, daß sich die Fallräume wirklich verhalten, wie die Quadrate der Fallzeiten, woraus man wieder rückwärts schließen kann, daß bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeit der Fallzeit proportional ist. Doch kann man das Letztere auch durch die Maschine selbst bewahrheiten. Um nämlich das Verhältniß zwischen der Geschwindigkeit und Fallzeit zu ermitteln, darf die Geschwindigkeit des Körpers von einem bestimmten Augenblick an nicht mehr wachsen, es müßte also plötzlich die Wirkung der Schwere auf den Körper vernichtet werden. Dies läßt sich nun mit Hülfe der Fallmaschine wirklich bewerkstelligen. Die beschleunigende Kraft ist nämlich hier nichts Anderes, als die Schwere des Uebergewichts. Wird nun diesem Uebergewichte eine etwas längliche Gestalt gegeben, so kann man es mittelst eines Ringes, welcher an der Säule angebracht ist, auffangen, sobald das Gewicht m durch denselben hindurchgeht. Von diesem Augenblicke an kommt das Gewicht in eine gewöhnlich gleichförmige Bewegung, da keine beschleunigende Ursache mehr auf dasselbe wirkt. Die Geschwindigkeit bestimmt sich dann durch den Weg, der von jenem Augenblicke an in der nächstfolgenden Secunde zurückgelegt wird.

Sollen diese Versuche möglichst genau ausfallen, so muß man den Einfluß der Reibung an der Axe der Rolle beseitigen. Will man keine sogenannten Frictionsrollen anwenden, so geschieht dies einfach dadurch, daß man auf der Seite des Niederganges vorher ein Gewichtchen auflegt, welches für sich allein noch nicht hinreicht, um Bewegung zu veranlassen. Wird dann das eigentliche Uebergewicht beigelegt, so geschieht die Bewegung so, als ob keine Reibung im Spiele wäre, da ihr jenes Gewichtchen das Gleichgewicht hält.

Beim freien Falle hat die Beschleunigung g einen Werth von etwas über 30 Fuß. Hiernach ist der Weg, welcher in der ersten Secunde durchfallen wird, ungefähr 15′, und in 2, 3, ... Secunden ist der Fallraum 60′,135′, ... nach der Formel $s = \frac{1}{2} g t^2$, wenn man $g = 30'$ und der Reihe nach $t = 1, 2, 3. ....$ setzt.

Digitized by Google

Aus der Formel $s = \frac{1}{2} g t^2$ folgt $t = \sqrt{\frac{2s}{g}}$ und dieser Werth in der Formel $c = g t$ substituirt giebt

$$c = \sqrt{2 g s} \quad (3),$$

welche Gleichung bequem ist, um aus einer gegebenen Fallhöhe die entsprechende Geschwindigkeit zu finden.

54. Bekommt ein Körper durch irgend einen Stoß eine vertical aufwärts gehende Bewegung, so muß er mit abnehmender Geschwindigkeit steigen, da die Wirkung der Schwere seiner Bewegung gerade entgegengesetzt ist. Nach einer gewissen Zeit muß seine aufwärts gerichtete Bewegung ganz aufhören, indem er nun wieder zu fallen beginnt. Man hat hier also eine gleichförmig verzögerte Bewegung, da die Geschwindigkeit fortwährend abnimmt und zwar in jeder Secunde um gleichviel, nämlich um $g = 30'$.

Nennt man a die anfängliche Geschwindigkeit des Körpers, welche ihm durch den Stoß ertheilt worden ist, so ist seine Geschwindigkeit nach t Secunden $c' = a - g t$ (1).

Sobald nun $a = g t$, hört das Steigen auf. Dies geschieht also, wenn die in t Secunden erlangte Fallgeschwindigkeit der Geschwindigkeit gleich ist, mit welcher der Körper zu steigen begann. Den höchsten Punkt seiner Bahn erreicht demnach der Körper in der Zeit $t = \frac{a}{g}$.

Vermöge der anfänglichen Geschwindigkeit a würde der Körper in t Secunden eine Höhe $= a t$ erstiegen haben, wenn nicht die Schwere diese Geschwindigkeit fortwährend verzögert hätte. Durch Einwirkung der Schwere wird die Höhe $a t$ um $\frac{g t^2}{2}$ vermindert. Folglich ist die wirkliche Höhe des Körpers

$$s' = a t - \frac{g t^2}{2} \quad (2).$$

Setzt man $t = \frac{a}{g}$, für welchen Werth, wie wir gefunden haben, das Steigen aufhört und das Fallen beginnt, in die Formel (2), so erscheint

$$s' = \frac{a^2}{2 g} \quad (3),$$

welches die Höhe ist, die der Körper in der Zeit $t = \frac{a}{g}$ erreicht.

Aus Formel (3) folgt $a = \sqrt{2 g s'}$. Man sieht also, daß ein schwerer Körper, der mit der Geschwindigkeit a vertical in die Höhe

Digitized by Google

getrieben wird, sich im leeren Raume bis zu der Höhe s' erhebt, von welcher er ohne Anfangsgeschwindigkeit herabfallen müßte, um dieselbe Geschwindigkeit a zu erhalten. Dabei ist die Zeit des Fallens gleich der Zeit des Steigens.

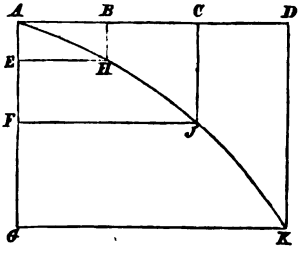
Wird ein Körper durch einen Stoß mit der Geschwindigkeit a vertical-abwärts getrieben, so gelten die Formeln

$$c' = a + gt, \quad s' = at + \frac{gt^2}{2},$$

weil nun die Wirkungen des Stoßes und der Schwere dieselbe Richtung haben.

55. Wenn ein Körper horizontal geworfen wird, so muß er eine krumme Linie beschreiben.

Man nehme an, dem Körper sei durch irgend einen Stoß eine Bewegung in horizontaler Richtung ertheilt worden. Wenn keine Wirkung der Schwere stattfände, so müßte er sich in dieser Richtung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortbewegen. Mag er durch den Stoß allein in einer Secunde den Weg AB, in zwei Secunden den Weg AC, in drei Secunden AD u. s. w. zurücklegen. Da aber die Schwere beständig auf ihn wirkt, so muß er von Anfang an um etwas sinken, und zwar in der ersten Secunde um BH = 15' (§. 53), in zwei Secunden um CJ = 4 . 15, in drei Secunden um DK = 9 . 15, u. s. w. Der Körper muß sich also durch gleichzeitige Wirkung des Stoßes und der Schwere am Ende der ersten Secunde vertical unter B in H, am Ende der zweiten vertical unter C in J, am Ende der dritten in D befinden, u. s. w. Man sieht, daß er die krumme Linie AHJK beschreiben wird. Nun ist nach dem Obigen



$$EH : FJ : GK : \ldots = 1:2:3:\ldots$$
$$EH^2 : FJ^2 : GK^2 : \ldots = 1:4:9:\ldots$$
$$AE : AF : AG : \ldots = 1:4:9:\ldots$$

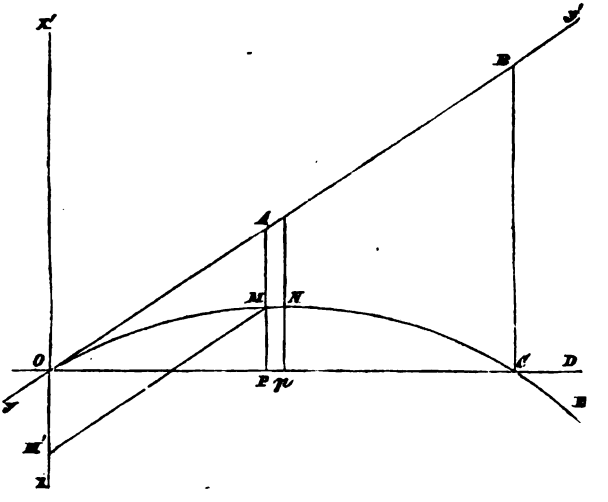
Also $EH^2 : FJ^2 : GK^2 : \ldots = AE : AF : AG : \ldots$

Letztere Eigenschaft charakterisirt aber eine Parabel, deren Are AG ist.

56. Wird ein Körper schief gegen den Horizont geworfen, so muß er ebenfalls eine Parabel beschreiben.

Digitized by Google

Man nehme an, der Körper werde mit der Geſchwindigkeit c nach der Richtung OB geworfen, welche mit dem Horizont OC den Winkel α bildet. Nun ſollte er ſich mit der Geſchwindigkeit c auf der Linie OB gleichförmig fortbewegen und in irgend einer Zeit t etwa nach A kommen, ſo daß $OA = ct$. Da aber die Schwere beſtändig auf ihn wirkt, ſo muß er vom Beginn ſeiner Bewegung an um etwas ſinken, und zwar in der Zeit t um $AM = \frac{1}{2} g t^2$. Er wird ſich alſo zur genannten Zeit nicht in A, ſondern in M vertical unter A befinden. Nun iſt $\frac{OA^2}{AM} = \frac{c^2 t^2}{\frac{1}{2} g t^2} = \frac{2c^2}{g}$. Betrachtet man xx′ als Abſciſſen- und yy′ als Ordinatenaxe, ſo hat man



ein ſchiefwinkliges Coordinatenſyſtem, deſſen Anfangspunkt O iſt. $OM' = AM = x$ iſt die Abſciſſe und $M'M = OA = y$ die Ordinate für den Punkt M. Demnach auch $\frac{y^2}{x} = \frac{2c^2}{g}$.

Nimmt man außerdem an, daß die Geſchwindigkeit c zur Höhe h gehört, ſo iſt nach Formel (3) in §. 53 $c^2 = 2gh$. Mithin $y^2 = 4hx$, welches die Gleichung der Parabel iſt, die der Körper beſchreibt. Man erkennt auch leicht, daß die Gerade OB die Parabel im Punkte O berührt, wo die Bewegung des Körpers ihren Anfang nimmt.

Die Entfernung des Punktes O vom Punkte C, wo der Körper auffällt, nennt man Wurfweite. Es ſei $OC = a$.

Man nehme nun an, der Körper falle am Ende der Zeit t in C auf. Dann iſt nach dem Früheren $BC = \frac{1}{2} g t^2$, und ohne

Digitized by Google

Einwirkung der Schwere würde der Körper den Weg OB in der Zeit t gleichförmig zurückgelegt haben, so daß OB = ct. Ferner ist OC = OB cos α oder a = ct cos α (1).

Da nun auch BC = OB sin α oder $\frac{1}{2} g t^2 = c t \sin \alpha$, so folgt $t = \frac{2 c \sin \alpha}{g}$ (2),

welcher Werth in (1) substituirt $a = \frac{2 c^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g}$

oder $a = \frac{c^2 \sin 2 \alpha}{g}$ giebt, da 2 sin α cos α = sin 2 α.

Das Maximum der Wurfweite tritt ein für α = 45°, weil dann sin 2 α = sin 90° = 1 ist. Also $a = \frac{c^2}{g} = 2 h$, d. h. gleich dem Doppelten der Höhe, die zur Anfangsgeschwindigkeit gehört, da wir angenommen $c = \sqrt{2 g h}$.

Die Zeit, in welcher der Körper die Parabel OMC durchläuft, ist nach (1) dieselbe, als wenn er die Wurfweite OC mit der Geschwindigkeit c cos α gleichförmig beschriebe. Diese Zeit findet ihren Ausdruck in der Formel (2), wonach also für die halbe Wurfweite Op oder für die Spitze N der Parabel $t = \frac{c \sin \alpha}{g}$ ist.

Es sei nun wieder OA = ct und AM = $\frac{1}{2} g t^2$. Da AP = OA sin α = ct sin α, so ist

MP = AP − AM = ct sin α − $\frac{1}{2} g t^2$.

Setzt man nun in diesen Ausdruck den obigen Werth von t für die halbe Wurfweite Op, so geht MP in Np über, wodurch sich die größte Höhe bestimmt, welche der Körper während des Wurfes erreicht. Demnach

$$Np = \frac{c^2 \sin^2 \alpha}{g} - \frac{g c^2 \sin^2 \alpha}{2 g^2}$$

$$= \frac{2 c^2 \sin^2 \alpha - c^2 \sin^2 \alpha}{2 g}, \text{ d. h.}$$

$$Np = \frac{c^2 \sin^2 \alpha}{2 g}.$$

Vom Punkte N an beschreibt der Körper den absteigenden Ast der Parabel OMC, da die Schwere noch beständig auf ihn einwirkt.

Die Geschwindigkeit, mit der er in C eintrifft, ist dieselbe, wie die Anfangsgeschwindigkeit, und nach der Tangente CE gerichtet, so daß der Fallwinkel ECD gleich ist dem Wurfwinkel BOC.

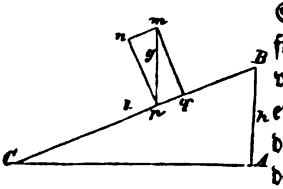
Wir haben in unseren bisherigen Betrachtungen auf den Widerstand der Luft keine Rücksicht genommen, wie es auch sein muß, um

Digitized by Google

die Gesetze der Bewegung rein herauszustellen. Tritt aber dieser Widerstand in Rechnung, so wird dadurch die Gestalt der Bahn geworfener Körper beinahe gänzlich abgeändert, worauf wir aber hier natürlich nicht weiter eingehen können.

57. Fällt ein Körper längs einer schiefen Ebene hinab, so ist seine Bewegung wieder eine gleichförmig beschleunigte.

Es sei ABC der Durchschnitt einer schiefen Ebene; mp stelle die Richtung und Größe g der Schwere vor. Dann läßt sich mp zerlegen in eine auf der Ebene senkrechte mq und in eine damit parallele mn. Erstere wird durch den Widerstand der schiefen Ebene aufgehoben, während letztere eine Bewegung längs derselben hervorbringt. Nennt man nun den Winkel, welchen die Ebene mit dem Horizont macht, α, so ist auch der Winkel $mpn = \alpha$, mithin $mn = g \sin \alpha$.



Setzt man also in den Formeln des §. 51 für die gleichförmig beschleunigte Bewegung vertical fallender Körper $g \sin \alpha$ statt g, so erhält man die entsprechenden Formeln für die gleichförmig beschleunigte Bewegung auf der schiefen Ebene. Nämlich

$$c = g t \sin \alpha, \quad s = \tfrac{1}{2} g t^2 \sin \alpha, \text{ und hieraus}$$

$$c = \sqrt{2 g s \sin \alpha}.$$

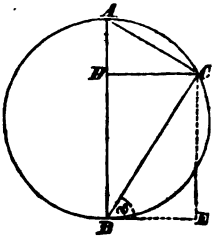
Sei l die Länge und h die Höhe der schiefen Ebene. Dann ist die Geschwindigkeit, womit ein Körper herabfällt,

$$c = \sqrt{2 g l \sin \alpha} = \sqrt{2 g h},$$

da $\sin \alpha = \frac{h}{l}$ ist.

Hieraus folgt, daß diese Geschwindigkeit dieselbe ist, als wenn der Körper die verticale Höhe h durchlaufen hätte.

Es sei ABC ein vertical stehender Kreis; sein Durchmesser AB $= a$, die Sehne $CB = l$, $DB = h$ und CD senkrecht auf AB.



Bewegt sich nun ein Körper längs der Sehne CB, so ist nach dem Vorhergehenden $l = \frac{1}{2} g t^2 \sin \alpha$, sofern α den Winkel CBE bezeichnet. Da aber auch $\sin \alpha = \frac{h}{l}$, so hat man $l = \frac{g h t^2}{2 l}$, und hieraus die Zeit, welche der Körper braucht, um die Sehne zu durchlaufen,

$$t = \sqrt{\frac{2 l^2}{g h}}.$$

Digitized by Google

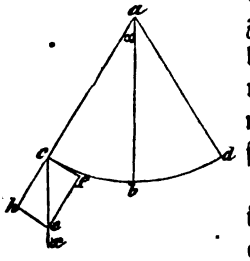
Nun ist aber bekanntlich $h : l = l : a$ oder $l^2 = ah$, mithin

$$t = \sqrt{\frac{2a}{g}}.$$

Durchläuft der Körper den verticalen Durchmesser a, so ist $a = \frac{1}{2} g t^2$, woraus gleichfalls $t = \sqrt{\frac{2a}{g}}$ hervorgeht. Man erkennt also, daß der Körper die Sehne CB in derselben Zeit durchläuft, wie den verticalen Durchmesser AB. Ebenso sind auch AB und die Sehne AC gleichzeitige Wege, wovon man sich auf dieselbe Weise überzeugen kann.

58. Zu den Bewegungen, welche durch die Schwere hervorgebracht werden, gehören auch die Schwingungen des Pendels. Unter einem Pendel versteht man im Allgemeinen einen festen schweren Körper, der sich um eine feste horizontale Are hin und her bewegt. Der leichteren Betrachtung wegen denkt man sich aber ein einfaches oder mathematisches Pendel, das aus einem materiellen schweren Punkte besteht, welcher mittelst eines unausdehnbaren, aber biegsamen Fadens, der weder Gewicht, noch Dichtigkeit hat, an einem festen Punkte aufgehängt ist. Indessen kann eine kleine Kugel an einem feinen Faden, dessen Länge im Verhältnisse zum Durchmesser der Kugel sehr groß ist, die Stelle eines solchen Pendels sehr wohl vertreten.

Wenn man das Pendel ab aus seiner verticalen Lage nach ac bringt und da sich selbst überläßt, ohne ihm einen Anstoß zu ertheilen, so macht es Schwingungen in der durch ab gehenden Verticalebene. Nämlich durch die Schwere wird es nach b getrieben, indem es den Bogen cb beschreibt. Mit der in b erlangten Geschwindigkeit steigt es nach der anderen Seite hin bis zum Punkte d auf, welcher mit c gleiche Höhe hat. Von d aus kehrt es wieder zu c zurück, um dieselbe Bewegung von Neuem zu beginnen, welche ohne Ende fortgehen würde, wenn sich keine Hindernisse entgegenstellten.



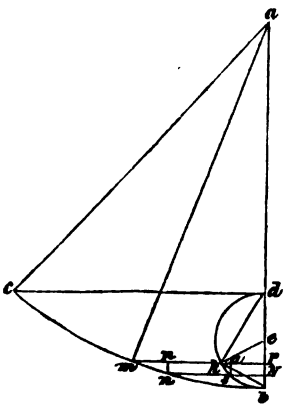
Ist cx die Richtung der Schwere, $ce = g$ ihre Beschleunigung, α der Winkel cab, welcher Ausschlag des Pendels genannt wird, so läßt sich hieraus leicht die Größe der Einwirkung bestimmen, welche von Seiten der Schwere in jedem Augenblick auf den materiellen Punkt ausgeübt wird. Denn man zerlege nur ce in die auf ac senkrechte cf und in die mit ihr parallele ch, so wird letztere durch den Widerstand der Linie ca aufgehoben, während noch $cf =$

Digitized by Google

$ce \sin cef = g \sin \alpha$ (da $cef = cab = \alpha$) übrig bleibt, wodurch die Bewegung des Pendels bestimmt wird. Nun hängt aber der Werth dieses Ausdrucks bei einerlei g von $\sin \alpha$ ab, und da der Winkel α fortwährend kleiner wird, indem sich das Pendel der Verticalen ab nähert, so folgt, daß die Bewegung im Bogen cb eine ungleichförmig beschleunigte ist. Im Punkte b also, wo das Pendel mit der Verticalen oder der Richtung der Schwere zusammenfällt, ist $\alpha = 90^0$, $\sin 90^0 = 1$, mithin $cf = g \sin 90^0 = g$, woraus wir schließen müssen, daß die Geschwindigkeit daselbst am größten ist. In Folge dieser Geschwindigkeit bewegt sich das Pendel weiter den Bogen bd hinauf, aber, wie man erkennt, ungleichförmig verzögert, da die Geschwindigkeit während des Aufsteigens in demselben Maße durch die Schwere vermindert wird, wie sie beim Hinabsteigen im Bogen cb vermehrt wurde, woraus dann hervorgeht, daß $cb = bd$ ist. Die schwingende Bewegung wiederholt sich nun in umgekehrter Ordnung, und zwar, wie wir schon bemerkt haben, unaufhörlich, falls nicht Hindernisse einen Stillstand zu Wege bringen.

59. Wir wollen nun unter der Voraussetzung, daß der Ausschlagwinkel α sehr klein ist, die Zeit t berechnen, welche das Pendel nöthig hat, um eine Schwingung, die vom Punkte c bis zum Punkte d gezählt wird, zu vollenden.

Es sei die Länge des Pendels $ab = l$. In der Lage am des Pendels wird der schwere Punkt eine Geschwindigkeit erlangt haben, welche derjenigen gleich ist, die er im freien Falle von d bis P erhalten hätte. Einer früheren Formel zufolge ist aber der allgemeine Ausdruck für die Geschwindigkeit c eines frei fallenden Körpers $c = \sqrt{2gh}$, wenn h die Fallhöhe bezeichnet. Demgemäß haben wir, da jetzt $h = dP$, für die Geschwindigkeit des materiellen Punktes $\sqrt{2gdP}$, womit er im nächsten Zeittheilchen τ ein unendlich kleines Stückchen mn seiner Bahn beschreiben wird, so daß man hat $mn = \tau\sqrt{2gdP}$, also $\tau = \frac{mn}{\sqrt{2g.dP}}$.



Man ziehe nun zu mP parallel nN und cd, welche auf ab senkrecht sind; np aber senkrecht auf mP. Dann

Digitized by Google

entstehen die ähnlichen Dreiecke mnp und amP, aus denen

$$mn : np = am : mP, \text{ also } mn = \frac{np \cdot am}{mP} = \frac{np}{ml}$$

Es ist aber auch $aP : mP = mP : Pb,$

$$mP^2 = aP \cdot Pb = Pb\,(2l - P$$

wofür auch $Pm^2 = Pb \cdot 2l$ gesetzt werden kann, wenn m erinnert, daß der Ausschlagwinkel cab sehr klein sein soll, r folgt, daß auch bd sehr klein und Pb so unbedeutend ist, gegen 2l vernachlässigt werden kann. Mit Berücksichtigung Werthe ist nun, da auch $np = PN$,

$$\tau = \frac{mn}{\sqrt{2g \cdot dP}} = \frac{l \cdot PN}{\sqrt{2g \cdot 2l \cdot dP \cdot Pb}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{I}{\sqrt{d}}$$

Beschreibt man über db einen Halbkreis, so ist in diesen

$$dP : Pk = Pk : Pb, \quad Pk = \sqrt{dP \cdot Pb}.$$

Daher $$\tau = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{PN}{Pk}.$$

Zieht man ferner vom Mittelpunkte e die Gerade ek und su parallel zu bd, so hat man die ähnlichen Dreiecke ekP und ksu, in denen ist: $ks : su\ (= PN) = ke : Pk$ oder $ks : ke = PN : Pk$,

$$\frac{ks}{ke} = \frac{PN}{Pk}. \quad \text{Also auch } \tau = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{ks}{ke}.$$

Man denke sich nun den Bogen cb in unendlich viele Theilchen zerlegt, von denen jedes $= mn$ ist, und nehme alle Zeittheilchen, in denen die einzelnen Bogenstückchen durchlaufen werden, zusammen. Dann erkennt man leicht, daß die Dauer der Bewegung durch den Bogen cb erhalten wird, wenn man $\frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}}$ mit der Summe aller Werthe multiplicirt, die der Bruch $\frac{ks}{ke}$ für jedes der Bogenstückchen nach und nach annimmt. Die Summe dieser Zeittheilchen ist aber $= \pi$, d. h. gleich dem Quotienten des Halbkreises dkb und seines Halbmessers ek. Nennt man daher die Zeit, in welcher der materielle Punkt eine ganze Schwingung vollendet, t, so hat man $\frac{t}{2}$ für die Dauer einer halben Schwingung, während deren das Pendel den Bogen cb durchläuft. Also $\frac{t}{2} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \frac{dkb}{ke}$ oder

$$t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}.\ *)$$

*) Baumgartner's Naturlehre, S. 231.

Digitized by Google

Aus dieſer Formel laſſen ſich leicht mehrere wichtige Folgerungen ziehen.

Bezeichnet man für ein anderes Pendel die Länge mit l und die Schwingungsdauer durch t', ſo iſt $t' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g}}$ und

$$t : t' = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} : \pi \sqrt{\frac{l'}{g}} = \sqrt{l} : \sqrt{l'},$$

d. h. die Schwingungszeiten verhalten ſich wie die Quadratwurzeln aus den Pendellängen.

Für ein und daſſelbe Pendel an verſchiedenen Orten hat man

$$t : t' = \sqrt{\frac{l}{g}} : \sqrt{\frac{l}{g'}} = \frac{1}{\sqrt{g}} : \frac{1}{\sqrt{g'}}$$

oder $$t^2 : t'^2 = g' : g.$$

Bezeichnet man durch n und n' die Anzahl der Schwingungen eines Pendels an verſchiedenen Orten während derſelben Zeit T, ſo iſt $T = nt$ und ebenſo $T = n' t'$, alſo $nt = n' t'$ und hieraus $n : n' = t' : t$. Folglich

$$g : g' = n^2 : n'^2,$$

d. h. die Intenſitäten der Schwere an verſchiedenen Orten verhalten ſich wie die Quadrate der Schwingungszahlen.

60. Die eben angeführten Geſetze gelten eigentlich nur für das einfache Pendel. Hat man ein zuſammengeſetztes Pendel, ſo werden die Theilchen, welche dem Drehpunkte näher liegen, ein Beſtreben haben, ſchneller zu ſchwingen, als die entfernteren. Da nun die Theilchen mit einander verbunden ſind, ſo müſſen die erſteren die Bewegung der letzteren beſchleunigen und dieſe die Bewegung jener verzögern. Hieraus läßt ſich ſchließen, daß in jedem zuſammengeſetzten Pendel ein Punkt vorhanden iſt, welcher durch die übrige Maſſe des Pendels weder beſchleunigt, noch verzögert wird. Man nennt ihn den **Schwingungspunkt**. Die Entfernung deſſelben von der Drehungsaxe iſt die Länge des einfachen Pendels, welches mit dem zuſammengeſetzten gleiche Schwingungsdauer hat. Näherungsweiſe kann man die Länge des einfachen Pendels, welches mit einem zuſammengeſetzten gleichzeitige Schwingungen macht, finden, wenn man ein einfaches Pendel neben dem zuſammengeſetzten aufhängt und es ſo lange verlängert oder verkürzt, bis beide ihre Schwingungen in derſelben Zeit vollführen.

Genauer findet man den Schwingungspunkt auf folgende Weiſe.

61. Am Ende a eines gewichtloſen Hebels, welcher im Punkte

Digitized by Google

c um eine verticale Axe drehbar ist, befinde sich eine Masse, die 1 Pfund betragen mag. Angenommen, es werde auf diese Masse in horizontaler Richtung ein Stoß ausgeübt, welcher sie nöthigt, in einer Secunde den Bogen ab zu beschreiben. Natürlich hängt die Geschwindigkeit der Bewegung sowohl von der Stärke des Stoßes, als auch von der Größe der Masse ab. Denkt man sich die Masse nach dem Punkte d gebracht, welcher nur halb so weit vom Drehpunkte entfernt ist, als a, so muß ihr derselbe Stoß eine Geschwindigkeit mittheilen, vermöge deren sie in gleicher Zeit den Bogen de zurücklegt, welcher dem Bogen ab gleich ist. Offenbar ist aber jetzt die Winkelgeschwindigkeit doppelt so groß als vorher, weil nun der Winkel, um welchen die Stange gedreht worden ist, zweimal so groß ist. Die Winkelgeschwindigkeit würde aber dieselbe geblieben sein, wenn man einen halb so starken Stoß ausgeübt oder in d eine doppelt so große Masse, also 2 Pfund, angebracht hätte. Wirkt nun, falls sich in d wirklich eine Masse von 2 Pfund befindet, der Stoß bei gleicher Stärke nicht unmittelbar auf diese Masse, sondern bei a auf die Stange, so muß er nach den Gesetzen des Hebels eben so wirken, als ob man in d einen Stoß von doppelter Stärke angewendet hätte, indem er die zweipfündige Masse von d nach e treibt. Soll also die Winkelgeschwindigkeit dieselbe bleiben, so muß man die Masse in d wieder verdoppeln, mithin 4 Pfund nehmen, wenn bei a ein Stoß von der anfänglichen Stärke wirkt. Eben so geschieht die Umdrehung mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, wenn man eine Masse von 9 Pfund dem Drehpunkte dreimal näher bringt, während in a derselbe Stoß ausgeübt wird, u. s. f. Soll also die Winkelgeschwindigkeit unverändert bleiben, so müssen sich die Massen umgekehrt verhalten wie die Quadrate ihrer Entfernungen vom Drehpunkte. Das Product aus der Masse in das Quadrat ihrer Entfernung vom Drehpunkte heißt das Trägheitsmoment derselben in Beziehung auf diesen Punkt.

Was vom Stoße, das gilt auch von irgend einer beschleunigenden Kraft, z. B. der Schwere, wenn sie eine an einem Hebelsarme befestigte Masse in eine rotirende Bewegung versetzt. Sollen sich z. B. zwei verschiedene Massen M und m, von denen sich die eine in der Entfernung ca = R, die andere aber in der Entfernung cd = r vom Drehpunkte befindet, mit gleicher Winkelgeschwindigkeit um den letzteren bewegen, so müssen sich ihre beschleunigenden Kräfte wie die

Digitized by Google

Bogen ab und df oder, was daſſelbe iſt, wie die Halbmeſſer ca und cd verhalten. Ihre bewegenden Kräfte ſind dann MR und mr, welche, wenn ſie gleich ſtark auf den Hebel wirken ſollen, ſich umgekehrt wie die Entfernungen der Maſſen vom Drehpunkte verhalten müſſen. Demnach $MR : mr = r : R$ oder $M : m = r^2 : R^2$.

62. Man habe nun eine Stange, welche um eine horizontale Are drehbar iſt und ſo ein Pendel darſtellt. Befindet ſich an derſelben 2 Decimeter vom Drehpunkte entfernt eine Maſſe von 2 Pfund, ſo bleibt die Schwingungsgeſchwindigkeit dieſelbe, wenn man 1 Decimeter vom Drehpunkte die Maſſe $2 . 2^2 = 8$ Pfund anbringt und darauf die beſchleunigende Kraft $2 . 2 = 4$ wirken läßt. Bezeichnet man allgemein die Maſſe durch m und die Entfernung vom Drehpunkte durch r, ſo kann man in der Entfernung 1 vom Drehpunkte die Maſſe mr^2 anbringen und darauf die beſchleunigende Kraft mr wirken laſſen, ohne die Schwingungsgeſchwindigkeit zu ändern.

Bringt man gleichweit über und unter dem Drehpunkte eines gewichtloſen Stabes zwei Gewichte an, von denen das untere das ſchwerere iſt, ſo iſt die träge zu bewegende Maſſe gleich der Summe beider Gewichte und die beſchleunigende Kraft gleich ihrer Differenz. Seien in einer Entfernung von 1 Decimeter über und unter dem Drehpunkte zwei Maſſen befeſtigt, deren Summe $= S$ und deren Differenz $= D$ iſt, ſo bleibt nach dem Obigen die Schwingungsgeſchwindigkeit unverändert, wenn man nur eine Maſſe m in der Entfernung r ſo anbringt, daß $mr^2 = S$ und $mr = D$. Nun iſt $\frac{S}{D} = \frac{mr^2}{mr} = r$, woraus folgt, daß man die Länge des einfachen gleich ſchnell ſchwingenden Pendels findet, wenn man die Summe der beiden Maſſen durch ihre Differenz dividirt.

Sind an einer unbiegſamen Linie bei a und b zwei Maſſen m und m′ befeſtigt, ſo hat man ein aus dieſen Maſſen zuſammengeſetztes Pendel. Die Entfernungen der Punkte a und b vom Drehpunkte c ſeien r und r′. Dann iſt die Summe der Trägheitsmomente dieſer Maſſen $mr^2 + m'r'^2$ und die Summe ihrer ſtatiſchen Momente $mr + m'r'$. Bringt man in der Entfernung 1 über und unter dem Drehpunkte eines unbiegſamen gewichtloſen Stabes zwei Maſſen an, deren Summe $S = mr^2 + m'r'^2$ und Differenz $= mr + m'r'$, ſo muß dieſer Stab eben ſo ſchnell ſchwingen, wie das zuſammengeſetzte Pen-

Digitized by Google

bei. Die Länge des einfachen gleich schnell schwingenden Pendels ist aber

$$\frac{S}{D} = \frac{m r^2 + m' r'^2}{m r + m' r'}$$

Auf dieselbe Weise hat man für ein aus beliebig vielen materiellen Punkten zusammengesetztes Pendel

$$l = \frac{m r^2 + m' r'^2 + m'' r''^2 + \ldots}{m r + m' r' + m'' r'' + \ldots},$$

wenn l die Länge des einfachen Pendels bezeichnet, welches mit dem zusammengesetzten Pendel gleiche Schwingungsdauer hat.

Man erhält allgemein bei einem zusammengesetzten Pendel die Entfernung des Schwingungspunktes vom Drehpunkte, wenn man die Summe der Trägheitsmomente aller materiellen Punkte durch die Summe ihrer statischen Momente dividirt.

Die Bestimmung des Trägheitsmomentes irgend eines Körpers ist eine Aufgabe für die Integralrechnung, indem man sich den Körper in unendlich kleine Theilchen zertheilt denken und die Summe der Trägheitsmomente aller dieser Theilchen bestimmen muß.*)

Macht man den Schwingungspunkt eines zusammengesetzten Pendels zum Drehpunkte, so bleibt die Schwingungsgeschwindigkeit dieselbe, worauf das sogenannte Reversionspendel beruht. Dasselbe besteht nämlich aus einem genau gearbeiteten Metallstabe, in welchem zwei Schneiden so angebracht sind, daß die Schwingungen stets mit gleicher Schnelligkeit geschehen, mag nun der Stab um die eine oder die andere Schneide schwingen. Die Entfernung beider Schneiden giebt die Länge des einfachen gleich schnell schwingenden Pendels.

---

*) Es sei ca eine schwere Linie oder Stange von gleichförmiger Dichtigkeit; ihre Länge sei l und ihre Masse M. Ist cb = x ein veränderliches Stück dieser Stange, so ist die Masse des Elementes be $\frac{M\,dx}{l}$ und sein Trägheitsmoment $\frac{Mx^2 dx}{l}$, da x seine Entfernung vom Drehpunkte c ist. Durch Integration dieses Differentialausdruckes findet sich das Trägheitsmoment des Stückes cb = x, nämlich $\frac{M}{a}\int x^2 dx = \frac{Mx^3}{3l}$ und, wenn man x = l setzt, auch das der ganzen Stange $= \frac{Ml^2}{3}$.

Auf ähnliche Weise berechnet man auch das Trägheitsmoment eines anderen Körpers, indem man sich ihn in Elemente zerlegt denkt und für jedes derselben das Trägheitsmoment bestimmt. Die Summe der Trägheitsmomente aller Elemente ist das Trägheitsmoment des ganzen Körpers.

Digitized by Google

Man nehme wirklich den Schwingungspunkt des Stabes zum Drehpunkte; dann treten in der obigen Formel $l-r$, $l-r'$, $l-r''$, ... an die Stelle von r, r', r'', ..., so daß, wenn man jetzt die Länge des einfachen gleich schnell schwingenden Pendels $= L$ setzt,

$$L = \frac{m(l-r)^2 + m'(l-r')^2 + m''(l-r'')^2 + \ldots.}{m(l-r) + m'(l-r') + m''(l-r'') + \ldots.} \text{ ist.}$$

Entwickelt man die angedeuteten Quadrate und setzt $mr^2 + m'r'^2 + m''r''^2 + \ldots = S$, $mr + m'r' + m''r'' + \ldots. = D$, $m + m' + m'' + \ldots. = M$, so hat man

$$L = \frac{Ml^2 - 2Dl + S}{Ml - D}.$$

Da nun $l = \frac{S}{D}$ oder $S = Dl$, so ist auch $L = \frac{Ml^2 - Dl}{Ml - D} = l$, womit die angeführte Eigenschaft des Schwingungspunktes erwiesen ist.

63. Huyghens war der Erste, welcher das Pendel anwandte, um den Gang der Uhren zu reguliren, wodurch eine genaue Zeitmessung möglich wurde.

Aus der Formel $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ findet sich $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. Dieser Ausdruck dient dazu, um mit großer Genauigkeit die Beschleunigung der Schwere an jedem Orte der Erde oder die Geschwindigkeit g zu bestimmen, welche die schweren Körper erlangen, wenn sie während der Zeiteinheit vertical fallen.

Für das Secundenpendel ist $t = 1$. Hat man nun ein Pendel von der Länge L, das in einer Secunde n Schwingungen macht, so ist die Länge l des Secundenpendels $= n^2 L$, da, wie wir schon wissen, $n^2 : 1 = l : L$. Für die Breite von Paris ist $l = 993{,}855$ mm. Substituirt man diese Werthe von t und l in obiger Formel für g, so ergiebt sich für Paris $g = 9{,}80896$ m.

Die Pendelversuche zeigen, daß die Schwere auf alle Arten von Materie auf gleiche Weise wirkt. Bessel hat Körper von der verschiedensten Art, wie Metalle, Marmor, Elfenbein, Meteorsteine, Thon, Quarz, u. s. w. schwingen lassen, aber immer ganz gleiche Werthe für g gefunden, woraus zweifellos folgt, daß alle Körper gleich schwer sind, sofern sie sich nur an demselben Orte der Erde befinden.

Bringt man eine Pendeluhr von Paris nach dem Aequator, so wird sie zu langsam gehen, indem sie in einem Tage ungefähr um 127 Secunden zurückbleibt. Das Secundenpendel macht also hier 127 Schwingungen weniger, woraus folgt, daß auch die Intensität

Digitized by Google

der Schwere am Aequator geringer ist. Sowie man sich vom Aequator entfernt, vermehren sich wieder die Schwingungen, so daß also die Schwere mit der geographischen Breite zunimmt. Da nun der Erdhalbmesser in höheren Breiten kleiner wird, so findet sich hier eine Bestätigung des Gesetzes, daß die Intensität der Schwere mit der Entfernung vom Mittelpunkte der Erde abnimmt, wie dies auch aus den Pendelversuchen hervorgeht, welche man in gleichen Breiten, aber in verschiedenen Höhen über dem Niveau des Meeres angestellt hat. So macht ein Pendel am Gipfel eines Berges weniger Schwingungen, als am Fuße desselben. Außerdem bemerkt man, daß ein Bleiloth in der Nähe großer Berge von der verticalen Richtung abgelenkt wird, woraus sich die Allgemeinheit der Anziehung unter allen Körpern schließen läßt. Maskelyne benutzte diese Ablenkung, um die mittlere Dichtigkeit der Erde zu bestimmen, indem er sie aus dem Verhältnisse der Masse des Gebirges zur Masse der ganzen Erde berechnete. Er fand hiernach die mittlere Dichtigkeit der Erde zu 4,56, wenn man die Dichtigkeit des Wassers als Einheit annimmt. Cavendish hat später mittelst eines besonderen Apparates die mittlere Dichtigkeit der Erde auf eine genauere Weise bestimmt.

Geht man vom Pariser Secundenpendel aus, so läßt sich nach bekannten Gesetzen die Länge des Secundenpendels für alle Orte der Erde berechnen. Wiewohl nun Rechnung und Beobachtung im Allgemeinen fast genau mit einander übereinstimmen, so weicht doch an gewissen Orten die Länge des Secundenpendels von dem Gesetze der Aenderung ab, welches die Theorie angiebt, was nur daher rühren kann, daß die Dichtigkeit des umliegenden Theiles der Erde beträchtlich größer oder kleiner ist, als die allgemeine Dichtigkeit der obersten Schichten. Das Pendel zeigt also auch durch seine Unregelmäßigkeiten die Aenderungen in der Beschaffenheit des Bodens auf eine weite Strecke hin an.

Aus dem Allen folgt aber, daß das Pendel für den Physiker eines der wichtigsten Instrumente ist.

Drittes Kapitel.

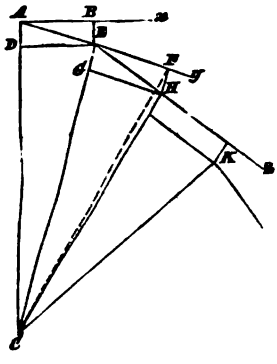
Von der Centralbewegung und Schwungkraft.

64. Denken wir uns einen völlig freien Körper, welcher durch irgend eine Ursache ununterbrochen nach demselben Punkte C hinge-

Digitized by Google

zogen wird, während er durch einen Stoß eine seitwärts gehende Bewegung erhalten hat, so haben wir eine sogenannte Centralbewegung, bei welcher der Punkt C der Centralpunkt heißt.

Man nehme nun vorerst an, jene Ursache wirke nicht stetig, sondern unterbrochen, dergestalt, daß eine Wirkung auf die andere in einer sehr kleinen Zeit τ folge, und daß der Körper in derselben Zeit in Folge des Stoßes oder, wenn man will, in Folge einer ursprünglichen Bewegung den Weg AB zurücklege, während er durch bloße Wirkung der Anziehung, deren Sitz in C ist, den Weg AD durchläuft.



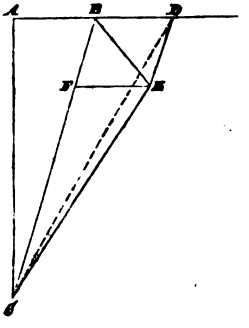
Alsdann muß der Körper aus bekannten Gründen unter gleichzeitiger Wirkung jener bewegenden Ursachen die Diagonale des Parallelogrammes ABED, welches aus AB und AD construirt ist, zurücklegen. Wenn nun in E keine weitere Anziehung von C aus stattfände, so würde der Körper in der Geraden Ey oder der Verlängerung der Diagonale AE fortgehen und in der Zeit τ wieder den Weg EF = AE beschreiben. Da aber in E wieder eine Anziehung auf den Körper eintritt, vermöge deren er den Weg EG beschreiben müßte, wenn er nicht schon in E eine Bewegung hätte, so muß er nothwendig EH zurücklegen, d. h. die Diagonale des Parallelogramms aus EF und EG. In H ist nun wieder derselbe Fall vorhanden, wie in E, u. s. f. Man erkennt, daß der Weg des Körpers das Vieleck AEHK ..... sein wird, welches sich aber einer stetig krummen Linie um so mehr nähert, je kleiner die Zeit τ ist, d. h. je schneller die Wirkungen der Anziehung auf einander folgen. Denkt man sich τ unendlich klein, d. h. läßt man die Ursache der Anziehung ununterbrochen wirken, so wird der Weg wirklich eine krumme Linie. Die Richtungen Ax, Ey, Hz ...., nach welchen der Körper fortschreiten würde, wenn die Ursache der Anziehung bei seiner Ankunft in A, E, H, ... plötzlich wegfiele, sind, wie man leicht erkennt, Tangenten der Bahn, welche der Körper in der That beschreibt. Die Gestalt dieser Bahn hängt von der Stärke des anfänglichen Stoßes (welcher auch Tangentialkraft genannt wird) oder von der Geschwindigkeit der ursprünglichen Bewegung, von der Stärke und dem Gesetze der Wirkung jener Anziehung (der man den Namen Centripetalkraft gegeben hat) und von der Lage des Centralpunktes ab.

Digitized by Google

65. Zieht man in unſerer Figur CF, ſo wird man bemerken, daß die Dreiecke ACE, ECF gleich ſind, weil ſie auf gleichen Grundlinien AE — EF ſtehen und einerlei Höhe haben; ebenſo ſind auch die Dreiecke ECF und ECH gleich, weil EC und FH parallel ſind, woraus folgt, daß auch die Dreiecke ACE und ECH an Flächeninhalt gleich ſind. Dies läßt ſich von je zwei ſolchen Dreiecken nachweiſen, woraus der Satz hervorgeht, daß bei einer durch Centralbewegung beſchriebenen Bahn die vom Centralpunkte zum bewegten Körper gehende Linie (der Radiusvector) in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume beſchreibt, und daß alſo die in verſchiedenen Zeiten vom Radiusvector beſchriebenen Flächenräume dieſen Zeiten ſelbſt proportional ſind.

Iſt umgekehrt die Bewegung eines freien Körpers von der Art, daß die von einem Punkte nach dem Körper gezogene Linie Flächenräume beſchreibt, die den Zeiten proportional ſind, ſo iſt die Bewegung des Körpers eine Centralbewegung und alſo auch eine Urſache vorhanden, welche den Körper ſtets nach jenem Punkte hinzieht und immer die Richtung des entſprechenden Radiusvector hat.

Denn es ſei AB das Stück der Bahn, welches der Körper in einer unendlich kleinen Zeit τ beſchreibt. Wirkte nun keine Kraft auf ihn, ſo würde er, wenn er in B angekommen iſt, in dem nächſten Zeittheilchen τ den Theil BD der Verlängerung von AB (— AB) beſchreiben. Da aber eine Urſache anziehend auf ihn wirkt, ſo muß er ſich in dem zweiten Zeittheilchen τ nach einem anderen Punkte E bewegen. Iſt nun BF die Richtung dieſer anziehenden Kraft im Punkte B, ſo kann man annehmen, daß ſie während der unendlich kleinen Zeit τ mit ſich ſelbſt parallel bleibe. Wenn aber C den feſten Punkt bezeichnet, um welchen der Radiusvector CB Flächen beſchreibt, die den Zeiten proportional ſind, ſo werden die Dreiecke ACB und BCE, welche in zwei gleichen Zeitabſchnitten beſchrieben ſind, gleich groß ſein, ebenſo die Dreiecke ACB und BCD, weil ihre Grundlinien AB und BD gleich ſind und in derſelben Geraden liegen und außerdem ihre Spitzen in dem Punkte C zuſammenfallen. Deshalb ſind auch die Dreiecke BCD und BCE gleich groß und da ſie dieſelbe Grundlinie CB haben, ſo muß die

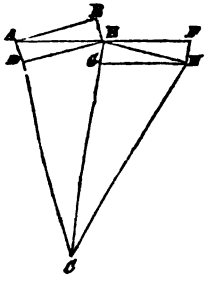


Digitized by Google

Gerade DE, welche ihre Spitzen verbindet, dieser Grundlinie parallel sein. Hieraus folgt nun, daß die Linie BF, die DE parallel ist, mit BC zusammenfällt. Daher ist in jedem Punkte B der Bahn die Richtung BF der anziehenden Kraft die des entsprechenden Radiusvector, was zu beweisen war.

66. Suchen wir nun die Gesetze der Centralbewegung für den Fall, daß sie in einem Kreise geschieht, näher zu bestimmen.

Zunächst sieht man, daß bei einer Centralbewegung im Kreise nicht nur die vom Radiusvector in gleichen Zeiten beschriebenen Flächenräume, sondern auch die in gleichen Zeiten durchlaufenen Bogen der Bahn selbst einander gleich sind. Denn es ist AC = EC = HC u. s. w. und da die Dreiecke ACE und ECH gleichen Flächeninhalt haben, so ist auch AE = EH u. s. w. Außerdem ist AE = EF = GH, also auch GH = EH. Wir verstehen hier unter EG das Maß der Geschwindigkeit, mit welcher der Körper in der Einheit der Zeit gegen den Anziehungsmittelpunkt C hingetrieben werden würde, wenn die Wirkung der Tangentialkraft plötzlich wegfiele. Wegen der Aehnlichkeit der gleichschenkligen Dreiecke ECH und EHG hat man



$$CE : EH = EH : EG, \text{ also}$$

$$EG = \frac{EH^2}{CE} \quad (1).$$

Bedeutet nun das Stück EH das Element der Bahn, welches in der Einheit der Zeit beschrieben wird, so ist offenbar $2\pi r = EH \cdot t$, wenn r den Halbmesser des Kreises und t die Zeit bezeichnet, in welcher der ganze Kreisumfang vom Körper gleichförmig zurückgelegt wird. Aus dieser Gleichung findet sich $EH = \frac{2\pi r}{t}$. Wird dieser Werth in Gleichung (1) substituirt, so ist, wenn man $EG = p$ setzt, $p = \frac{4\pi^2 r}{t^2}$.

Die Anziehung, welche vom Centralpunkt ausgeht, ist also dem Halbmesser des beschriebenen Kreises direct und dem Quadrate der Umlaufszeit umgekehrt proportional.

Denken wir uns einen zweiten Körper, welcher in der Entfernung R und in der Zeit T sich um denselben Centralpunkt, wie der

Digitized by Google

vorige, in einem Kreiſe bewegt, ſo haben wir gleichfalls

$$P = \frac{4\pi^2 R}{T^2},$$

wo P dieſelbe Bedeutung hat, wie p in der obigen Formel.

Setzen wir voraus, daß die Intenſität der Anziehung im umgekehrten Verhältniſſe des Quadrates der Entfernung ſteht, wie faſt alle Wirkungen, die von einem Punkte nach allen Richtungen ausgehen, ſo hat man

$$p : P = \frac{1}{r^2} : \frac{1}{R^2} = R^2 : r^2$$

und wenn für p und P die oben gefundenen Werthe geſetzt werden

$$\frac{r}{t^2} : \frac{R}{T^2} = \frac{1}{r^2} : \frac{1}{R^2}$$

$$r^3 : R^3 = t^2 : T^2.$$

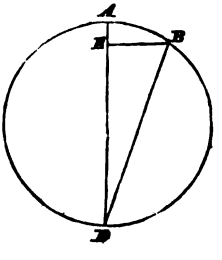
Für zwei verſchiedene Körper, welche ſich um denſelben Punkt im Kreiſe bewegen, verhalten ſich dieſer Proportion zufolge die dritten Potenzen der Halbmeſſer ihrer Bahnen wie die Quadrate der Umlaufszeiten.

Dieſes Geſetz nebſt dem vorher gefundenen, daß die vom Radiusvector in gleichen Zeiten beſchriebenen Flächenräume gleich ſind, dient zur Beſtimmung der Bewegung der Himmelskörper. Kepler hat die Geſetze der Centralbewegung der Planeten aus aſtronomiſchen Beobachtungen abgeleitet und Newton ſpäter die mathematiſche Theorie derſelben begründet in ſeinen „Principiis philosophiae naturalis mathematicis.“

Uebrigens bewegen ſich die Planeten in Ellipſen, in deren einem Brennpunkte die Sonne ſteht, befolgen aber dabei die obigen Geſetze.

67. Wir wollen nun beiſpielsweiſe die Größe der Anziehung beſtimmen, durch welche der Mond in ſeiner Bewegung um die Erde nach dem Mittelpunkte derſelben hingetrieben wird.

Iſt der Bogen AB das Stück der Bahn, welches der Mond in einer Minute beſchreibt, ſo iſt die Projection AE dieſes Bogens auf den Durchmeſſer AD der Weg, welchen der Mond vermöge der Anziehungskraft der Erde allein in einer Minute zurücklegen würde, wenn er in A noch keine Bewegung hätte. Man kann den Bogen AB füglich für eine gerade Linie anſehen, dann iſt das Dreieck ABD ein rechtwinkliges, in welchem man bekanntlich hat,



Digitized by Google

wenn man berücksichtigt, daß BE senkrecht auf AD ist, AE : AB = AB : AD

$$\text{oder} \qquad AE = \frac{AB^2}{AD}.$$

Der Umfang der Erdbahn beträgt nun 40,000,000 Meter, dagegen der der Mondsbahn 2,400,000,000, da der Halbmesser der Mondsbahn gleich 60 Erdhalbmessern ist. Die Zeit, welche der Mond braucht, um diese seine Bahn zu beschreiben, beträgt 27 Tage, 7 Stunden und 43 Minuten oder 39343 Minuten. Hieraus findet man sofort, daß er in 1 Minute einen Weg von 61000 Meter zurücklegt. Da ferner der Durchmesser der Mondsbahn gleich 763,950,000 Meter ist, so erhält man durch Berücksichtigung dieser Werthe $AE = 4{,}88^m$ für den Fallraum des Mondes gegen die Erde in der Minute.

Die Schwere oder die Anziehung, welche die Erde auf alle Körper an ihrer Oberfläche ausübt und vermöge deren dieselben gegen ihren Mittelpunkt hinfallen, nimmt mit wachsender Entfernung und zwar mit dem Quadrate derselben ab. Ist also der Fallraum der Körper an der Erdoberfläche in der ersten Secunde 4,90 Meter, so muß der des Mondes gegen die Erde $\frac{4{,}90}{60^2}$ in der Secunde oder $\frac{4{,}90}{60^2} \cdot 60^2 = 4{,}90^m$ in der Minute betragen, da der Mond 60mal weiter als jene Körper vom Mittelpunkte der Erde entfernt ist, und daher auch die Anziehung der Erde $60^2 = 3600$mal schwächer geworden ist. Hieraus folgt nun, daß der Mond, wenn er sonst gar keine Geschwindigkeit hätte, sich in einer Minute durch denselben Raum nach der Erde hin bewegen müßte, den irgend ein Körper an der Oberfläche der Erde in einer Secunde durchläuft.

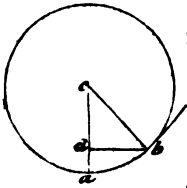
Die Vergleichung des eben erhaltenen Werthes $4{,}90^m$ für den Fallraum des Mondes mit dem nach der obigen Formel gefundenen $4{,}88^m$ zeigt nur einen geringen Unterschied, welcher noch unbedeutender sein würde, wenn wir den Halbmesser der Mondsbahn und die Umlaufszeit genauer angenommen hätten, als es hier der Einfachheit wegen geschehen ist.

Aus dem Allen geht nun klar hervor, daß die Schwere an der Oberfläche der Erde auch die Ursache ist, welche den Mond in seiner Bewegung um die Erde erhält. Und auf dieselbe Weise, wie der Mond um die Erde, werden wieder beide sammt den übrigen Planeten um die Sonne getrieben, so daß die Schwere an der Oberfläche

Digitized by Google

der Erde nur ein besonderer Fall der allgemeinen Anziehung ist, die man allgemeine Schwere oder wohl auch Gravitation nennt.

68. Nehmen wir an, ein Körper habe durch einen Stoß eine Bewegung in gerader Linie erhalten, so sollte er sich mit der einmal empfangenen Geschwindigkeit in dieser Linie ohne Ende fortbewegen. Wird nun der Körper durch irgend eine Ursache (z. B. durch eine Anziehung) fortwährend von der geraden Richtung abgelenkt, so wissen wir, daß er sich in einer krummen Linie bewegen muß, jedoch mit Beibehaltung des Strebens, sich von dieser Bahn in der Richtung der Tangente zu entfernen, welches auch wirklich geschehen würde, sobald jene Ursache zu wirken aufhörte. In Folge dieses Bestrebens übt der Körper senkrecht gegen die Bahn einen Druck aus, welcher entweder durch die Ursache, die den Körper fortwährend von der Richtung seiner anfänglichen Bewegung ablenkt, oder durch sonst einen Widerstand aufgehoben wird. Man denke sich z. B. eine kleine



gewichtlose Kugel im Punkte c an einer Schnur befestigt. Ertheilt man nun dieser Kugel durch den Stoß eine gewisse Geschwindigkeit, so wird sie sich mit derselben in einem Kreise um den Punkt c bewegen, wobei die Schnur beständig eine Spannung auszuhalten hat, welche mit der Geschwindigkeit der Umdrehung im directen Verhältnisse steht. Wird die Schnur in irgend einem Augenblick durchgeschnitten, so muß die Kugel in der Richtung der Tangente sich von der Kreisbahn entfernen. Jenes Streben oder die Spannung, welche die Schnur erleidet, nennt man Fliehkraft, Schwungkraft oder auch Centrifugalkraft; sie ist also eine reine Folge der anfänglichen Geschwindigkeit des Körpers.

69. Nimmt man an, daß jener kleinen Kugel (siehe vorige Fig.) durch einen Stoß eine Geschwindigkeit = a senkrecht auf die Länge des Fadens mitgetheilt sei, so wird sie einen Kreis beschreiben, dessen Mittelpunkt und Halbmesser jener feste Punkt und die Länge des Fadens ist. Man kann den Faden ganz außer Acht lassen, wenn man an dem Körper eine Kraft anbringt, die der Spannung des Fadens gleich und beständig nach dem festen Mittelpunkte gerichtet ist. Dann wird der Kreis vermöge dieser Kraft und der anfänglichen Geschwindigkeit a beschrieben. Würde nun der Körper nicht durch die Geschwindigkeit a getrieben, so müßte er vermöge der Centralkraft, welche die Spannung des Fadens vertritt und beständig nach dem Punkte c gerichtet ist, in einer unendlich kleinen Zeit das Stück ad oder auch

Digitized by Google

die Projection des Bogens ab, den er wirklich beschreibt, auf ac zurücklegen. Man wird erkennen, daß hier die Fliehkraft der Centralkraft gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist. Zufolge der in §. 66 angestellten Betrachtungen über die Centralbewegung findet die Fliehkraft ihren Ausdruck in der Formel

$$p = \frac{4\pi^2 r}{t^2}.$$

Hiernach ist also die Fliehkraft dem Halbmesser des Kreises direct und dem Quadrate der Zeit einer ganzen Umdrehung umgekehrt proportional.

Nun ist aber nach dem Obigen $2\pi r = a \cdot t$, $t^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{a^2}$; wird dieser Werth in p substituirt, so erscheint

$$p = \frac{a^2}{r}.$$

Die Fliehkraft ist also auch dem Quadrate der Geschwindigkeit direct und dem Halbmesser des Kreises umgekehrt proportional.

Diese Formel gilt auch für die Fliehkraft in jeder anderen krummen Bahn, wenn man für r den entsprechenden Krümmungshalbmesser nimmt.

70. Um die Schwungkraft im Kreise mit der Schwere zu vergleichen, nehme man an, die Geschwindigkeit a gehöre zur Höhe h, so daß $a^2 = 2gh$ ist, wo g bekanntlich die Beschleunigung der Schwere bezeichnet. Alsdann ist $g = \frac{a^2}{2h}$ und

$$\frac{p}{g} = \frac{2h}{r},$$

woraus folgt, daß die Schwungkraft sich zur Schwere verhält, wie das Doppelte der Höhe, welche zur Geschwindigkeit des Körpers gehört, zum Halbmesser.

71. Wenn sich ein Körper um eine Axe dreht, so bekommen alle außerhalb derselben liegenden Theile ein Bestreben, sich nach einer auf ihr senkrechten Richtung von ihr zu entfernen. Sind nun die Theile eines solchen Körpers verschiebbar, so erfolgt dadurch eine Aenderung in seiner Gestalt und unter Umständen auch eine Trennung seiner Theile. So bekommt eine weiche Kugel, die sich um einen ihrer Durchmesser dreht, eine abgeplattete Gestalt, da die Theile, welche in der Ebene des größten auf der Axe senkrechten Kreises liegen, eine größere Schwungkraft erhalten, als diejenigen, welche sich in der

Digitized by Google

Ebene der kleineren Kreiſe befinden. Auf dieſe Weiſe kann man ſich die Abplattung der Erde erklären.

Die Fliehkräfte der Körper, welche ſich an der Oberfläche der Erde befinden und ſich mit dieſer um die Are der Pole drehen, verhalten ſich alſo zu einander, wie die Halbmeſſer der Parallelkreiſe, welche ſie während der Umdrehung beſchreiben.

Die Schwungkraft wirkt nun, wie leicht zu erkennen, der Schwere ſtets entgegen und zwar am meiſten am Aequator, weil ſie hier ihren größten Werth hat und der Schwere gerade entgegengeſetzt iſt. Am Aequator muß alſo das Gewicht der Körper dem Ueberſchuſſe der Anziehung der Erde über die Schwungkraft gleich ſein. Bezeichnet daher g das Gewicht der Körper, G die Anziehung der Erde für den Fall, daß ſich dieſelbe nicht um ihre Are drehte, r den Halbmeſſer des Aequators und t die Zeit der Umdrehung der Erde, ſo hat man

$$g = G - \frac{4\pi^2 r}{t^2},$$

oder

$$g = G\left(1 - \frac{4\pi^2 r}{g t^2}\right),$$

wenn man bedenkt, daß das zweite Glied jener Formel ſehr klein im Verhältniſſe zum erſten iſt.

Nun iſt nahe $2\pi r = 40{,}000{,}000$ Meter und $t = 86{,}164$ Secunden, g aber gleich $9{,}^{80896}$ Meter. Dieſe Werthe geben

$$\frac{4\pi^2 r}{g t^2} = \frac{1}{289}$$

für die Verminderung des Gewichts der Körper am Aequator. Man ſieht, daß dieſer Bruch um ſo größer wird, je kleiner t oder je ſchneller die Arendrehung der Erde geſchieht. Da nun $289 = 17^2$, ſo folgt, daß, wenn die Umdrehung der Erde im 17ten Theile eines Tages geſchähe, die Schwungkraft der Schwere am Aequator gleich wäre, und die Körper dort, ſich ſelbſt überlaſſen, im Gleichgewichte bleiben würden. Vom Aequator nach den Polen hin muß die Schwungkraft fortwährend abnehmen, ſo daß ſie an den Polen ſelbſt verſchwindet.

Viertes Kapitel.

Von den Hinderniſſen der Bewegung.

72. Bisher haben wir die Bewegung, wie dies natürlich iſt, ohne Rückſicht auf mögliche Hinderniſſe betrachtet. Die Bewegungs-

Digitized by Google

geſetze erleiden aber in der Wirklichkeit mancherlei Modificationen, da faſt jede Bewegung einen Widerſtand findet. Läge ein Körper mit abſolut glatten Flächen auf einer abſolut glatten, horizontalen Unterlage, ſo müßte die geringſte Kraft eine gleichförmige Bewegung hervorbringen; es wäre dann nur, wie man zu ſagen pflegt, der Widerſtand der Trägheit zu überwinden, welcher allein von der Maſſe des Körpers abhängt und nach §. 47 zu beurtheilen iſt. Da aber kein Naturkörper abſolut glatte Flächen hat, ſo macht ſich hier die Reibung als Bewegungshinderniß geltend, welches überall vorkommt, wo ſich ein Körper irgendwie auf einem anderen fortbewegt. Gewiß rührt ſie daher, daß die Erhabenheiten des einen Körpers in die Vertiefungen des anderen wechſelſeitig eingreifen.

Um die Reibung zu überwinden, iſt mitunter ein bedeutender Kraftaufwand nöthig. Soll ein Körper, der auf einer Unterlage ruht, in Bewegung geſetzt werden, ſo müſſen entweder die Hervorragungen abgeriſſen werden, wie bei ſehr rauhen Flächen, oder der Körper muß über die Erhabenheiten hinweggehoben werden, wie dies bei wohl geebneten Flächen ſtattfindet. Im letzteren Falle verhält ſich die Sache gerade ſo, als ob der Körper auf einer abſolut glatten, ſchiefen Ebene hinaufgezogen würde.

73. Hiernach erſieht man leicht, daß die Reibung vom Drucke abhängen muß, welchen der Körper auf die Unterlage ausübt. Um die Geſetze der Reibung durch den Verſuch zu ermitteln, wendeten Muſchenbroek und ſpäter Coulomb einen ſogenannten Reibungsmeſſer an. Man denke ſich nämlich einen feſten, horizontalen Tiſch, auf welchen man Bohlen von verſchiedenem Material legen kann. Auf eine ſolche Bohle legt man nun eine Schleife von demſelben oder irgend einem anderen Material, befeſtigt daran eine Schnur, welche über eine Rolle geht und an ihrem Ende eine Schale zur Aufnahme von Gewichten trägt. Mit dieſem Apparate laſſen ſich leicht Verſuche über die Reibung zwiſchen Körpern von derſelben oder verſchiedener Materie anſtellen, indem man das Gewicht auf der Schale beſtimmt, bei welchem gerade die Bewegung der Schleife erfolgt. Das Verhältniß dieſes Gewichts zum Gewichte des Körpers oder zu ſeinem Drucke auf die Unterlage iſt der ſogenannte Reibungscoefficient, durch welchen die Gleichungen des Gleichgewichts an den Maſchinen auf verſchiedene Weiſe abgeändert werden. Natürlich ändert ſich dieſer Coefficient mit der Beſchaffenheit des Körpers und der Politur der Oberflächen, welche mit einander in Berührung kommen. Auch erreicht er ſeinen größten Werth erſt dann, wenn die

Digitized by Google

Berührung des Körpers und der Unterlage eine Zeit lang gedauert hat, was bei Körpern von verschiedener Beschaffenheit verschieden sein muß.

Man bezeichne den Druck des Körpers senkrecht auf die Unterlage durch D, den Reibungswiderstand durch F, und bei einem anderen Körper von derselben Materie und unter sonst gleichen Umständen die ähnlichen Größen durch d und f, so ist

$$F : f = D : d$$

oder

$$F = \frac{f}{d} \cdot D.$$

Ist nun für einen bestimmten Fall $\frac{f}{d} = \mu$ durch Versuche gefunden, so ist für alle Fälle dieser Art

$$F = \mu \cdot D.$$

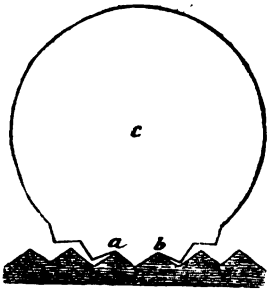
Zur Ermittelung des Reibungscoefficienten kann man sich auch einer schiefen Ebene mit veränderlichem Neigungswinkel bedienen. Kommt auf dieselbe ein Körper zu liegen, so wissen wir aus §. 34, daß die Kraft, mit welcher der Körper längs der schiefen Ebene hinabzugleiten sucht, $= G \sin \alpha$ und der Druck des Körpers senkrecht gegen die schiefe Ebene $= G \cos \alpha$ ist, wenn G das Gewicht des Körpers und α den Neigungswinkel bezeichnet. Nun ist die Reibung ein Widerstand, welcher der schiefen Ebene parallel wirkt und den Körper am Hinabgleiten zu hindern sucht. Wenn der Neigungswinkel eine gewisse Grenze nicht überschreitet, so ist die Reibung allein im Stande, den Körper auf der Ebene zurückzuhalten. Ist aber α der Grenzwinkel, bei welchem die Bewegung des Körpers gerade beginnt, dann ist, weil die Reibung einen bestimmten Bruchtheil f des Druckes ausmacht, $fG \cos \alpha = G \sin \alpha$, woraus $f = \operatorname{tang} \alpha$ als Reibungscoefficient hervorgeht.

74. Alle Versuche kommen darin überein, daß die Reibung unter sonst gleichen Umständen dem Drucke proportional, dagegen von der Größe der reibenden Flächen und der Geschwindigkeit der Bewegung unabhängig ist. Auch reiben sich im Allgemeinen gleichartige Körper stärker, als ungleichartige. Bei Holz ist die Reibung geringer, wenn die Fasern sich durchkreuzen, als wenn sie mit einander parallel laufen. Um die Reibung zu vermindern, gebraucht man zweckmäßige Schmiermittel, wie Oel für Metalle und Talg für Holz.

Die bisher besprochene Reibung führt den Namen der gleitenden, welche auch da stattfindet, wo sich Zapfen in ihren Lagern drehen, wie z. B. die Axen der Wagenräder.

Digitized by Google

75. Von der gleitenden Reibung verschieden ist die wälzende, welche überall vorkommt, wo ein runder Körper, wie eine Walze, auf einer Ebene fortrollt. Hier tritt die Unterlage immer mit anderen Punkten des Körpers in Berührung. Die wälzende Reibung ist viel geringer als die gleitende, wie dies die beigegebene Figur erläutern mag. Soll der runde Körper auf seiner Unterlage fortgeschleift werden, so muß er vorerst die kleine schiefe Ebene d b hinaufgezogen werden, wobei sein Schwerpunkt um die Höhe dieser Ebene oder um so viel gehoben wird, als d unter b liegt. Soll aber der Körper auf der Unterlage fortrollen, so muß er sich um den Punkt b der Hervorragung drehen, und man erkennt sogleich, daß in diesem Falle, also bei der wälzenden Reibung, die wechselnde Hebung und Senkung des Schwerpunktes viel geringer ist, als bei der gleitenden. Eben so leicht sieht man, daß die wälzende Reibung vom Halbmesser des Körpers abhängen muß; sie steht damit im umgekehrten Verhältnisse. Bezeichnet man den Halbmesser durch r, so findet diese Reibung ihren allgemeinen Ausdruck in der Formel



$$F' = \mu \cdot \frac{D}{r},$$

wenn μ und D dasselbe bedeuten, wie bei der gleitenden Reibung.

Es versteht sich von selbst, daß die Adhäsion einen großen Einfluß auf die Reibung jeder Art haben muß.

76. Geht die Bewegung eines Körpers, wie gewöhnlich, in irgend einem Mittel vor sich, so übt dasselbe der Richtung der Bewegung entgegen einen Druck auf den Körper aus. Der Widerstand, welcher hieraus erwächst, hängt außer der Dichtigkeit und sonstigen Natur des flüssigen Mittels noch wesentlich von der Gestalt, Größe und Geschwindigkeit des bewegten Körpers ab. Unter übrigens gleichen Verhältnissen ist der Widerstand dem Quadrate der Geschwindigkeit des Körpers proportional, was jedoch nur bei mittleren Geschwindigkeiten mit der Erfahrung übereinstimmt. So ist z. B. bei den sehr kleinen Schwingungen des Pendels der Widerstand der Luft nur der einfachen Geschwindigkeit proportional.

Die Bewegung der freifallenden Körper weicht wegen des Widerstandes der Luft von der gleichförmig beschleunigten ab und nähert

Digitized by Google

ſich fortwährend der gleichförmigen. In dieſem Widerſtande liegt der Grund, warum nicht alle Körper von derſelben Höhe gleich ſchnell zur Erde fallen. Der dichtere Körper kann den Widerſtand der Luft leichter überwinden, als der weniger dichte, weil ſeine Bewegungsgröße unter demſelben Rauminhalte bedeutender iſt. Bei manchen Körpern wird die Bewegung in der Luft eine verzögerte, wie ſich dies z. B. an fallenden Federn beobachten läßt.

Digitized by Google

Vierter Abſchnitt.

Vom Gleichgewicht tropfbar-flüſſiger und gasförmiger Körper.

Erſtes Kapitel.

Vom Gleichgewicht tropfbarer Flüſſigkeiten.

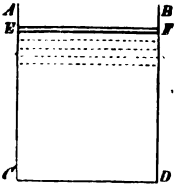
77. Die weſentliche Eigenſchaft tropfbarer Körper beſteht in der leichten Beweglichkeit ihrer Theilchen nach allen Richtungen. In der Regel iſt der Zuſammenhang zwiſchen dieſen Theilchen ſo ſchwach, daß ſie dem geringſten Verſuche einer Trennung nachgeben und ſich in einzelne Tropfen auflöſen. Wir werden in der Lehre von der Wärme auf die Natur dieſer Klaſſe von Körpern wieder zurückkommen.

Man nennt einen tropfbaren Körper vollkommen flüſſig, wenn ſich ſeine kleinſten Maſſentheilchen ohne den geringſten Widerſtand an einander verſchieben laſſen. Dieſem vollkommenen Zuſtande nähern ſich die in der Wirklichkeit vorkommenden Flüſſigkeiten mehr oder weniger; am meiſten z. B. comprimirte Schwefelwaſſerſtoffſäure, comprimirter Kohlenwaſſerſtoff, Waſſer, Queckſilber, weniger die fetten Oele.

78. Mit der erwähnten Eigenſchaft tropfbarer Flüſſigkeiten ſteht in innigem Zuſammenhange, daß ſie jeden Druck, der auf einen Theil ihrer Oberfläche ausgeübt wird, nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzen.

Es ſei ABCD der verticale Durchſchnitt eines Gefäßes, welches auf einer horizontalen Ebene ruht und bis EF mit einer Flüſſigkeit gefüllt iſt, die wir uns der Einfachheit wegen als gewichtlos denken wollen. Ueber der Flüſſigkeit befinde ſich ein Stempel, welcher das Gefäß genau ſchließt und von deſſen Gewicht wir gleichfalls abſehen

Digitized by Google



wollen. Dies vorausgesetzt kann die Flüssigkeit für sich keinen Druck auf den Boden des Gefäßes ausüben. Wird aber der Stempel mit einem Gewicht P belastet, so muß er auf die Oberfläche der Flüssigkeit mit einem Druck wirken, welcher sich durch alle Schichten bis zum Boden fortpflanzt. Denn die dem Stempel zunächst liegende Schicht hat den ganzen Druck des Gewichtes P auszuhalten und muß auf die folgende Schicht eben so stark drücken, wie sie selbst vom Stempel gedrückt wird. Dies geht so fort bis zum Boden, welcher denselben Druck erfährt, als wenn das Gewicht unmittelbar auf ihm läge und gleichförmig auf seiner ganzen Fläche verbreitet wäre. Jeder Punkt derselben wird gleich stark im verticalen Sinne gedrückt und man sieht leicht, daß der Druck auf den Boden der Ausdehnung seiner Fläche proportional ist, was auch von jedem Theile derselben gilt. Bezeichnet man die Basis des Gefäßes durch a, einen Theil derselben durch α, so ist der Druck x, welcher auf den letzteren fällt, offenbar $\frac{P\alpha}{a}$, da $P : x = a : \alpha$.

Wie auf den Boden, so pflanzt sich der an der Oberfläche angebrachte Druck auch auf die Seitenwände des Gefäßes fort, so daß jeder Theil α derselben einen Druck auszuhalten hat, welcher dem kurz zuvor bestimmten auf einen eben so großen Theil des Bodens vollkommen gleich ist.

Nimmt man aus einer Seitenwand ein Stück heraus, welches mit dem Stempel gleichen Flächeninhalt hat, so muß man daselbst einen Druck anwenden, welcher P gleich und entgegengesetzt ist, wenn die Flüssigkeit nicht heraustreten, also Gleichgewicht bestehen soll. Die Theile der Grundfläche des Stempels werden nicht minder, als alle übrigen Theile des Gefäßes von innen nach außen gedrückt, und zwar nach Richtungen, welche auf ihnen senkrecht stehen. Macht man daher ein Loch in den Stempel, so wird aus diesem das Wasser mit einer Gewalt hervorspritzen, welche jenem Drucke entspricht.

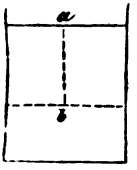
Auf dieselbe Weise wirkt der Druck auf die Theilchen im Innern der Flüssigkeit. Denkt man sich ein Theilchen der Flüssigkeit, welches von ebenen Flächen begrenzt ist, oder ein in dieselbe getauchtes festes Polyeder, so erleidet jeder Theil α einer der Seitenflächen von außen nach innen einen senkrechten Druck $= \frac{P\alpha}{a}$.

79. Das Princip der Gleichheit des Druckes findet auch noch

Digitized by Google

bei Flüssigkeiten statt, die einen gewissen Grad von Zähigkeit haben, jedoch mit dem Unterschiede, daß die Fortpflanzung des Druckes nach den Seiten hin nicht mit derselben Geschwindigkeit geschieht, als nach der Richtung der Kraft P selbst. Da aber nach einer gewissen Zeit der Seitendruck dem directen Drucke gleich wird, so muß man das Gleichgewicht der Flüssigkeit in diesem Moment betrachten.

80. Wenn die Flüssigkeit in einem Gefäße schwer ist, so pflanzt sie zwar den Druck, der auf ihre Oberfläche ausgeübt wird, auf dieselbe Weise fort, als ob sie kein Gewicht hätte, außerdem aber übt sie einen Druck aus, der von ihrem Gewichte herrührt und von einem Punkte zum anderen veränderlich ist. Der Druck, welchen hierdurch ein Theilchen im Innern der Flüssigkeit erleidet, hängt von seiner Tiefe unter dem Niveau der Flüssigkeit ab. So hat z. B. das Theilchen b einen Druck nach allen Seiten auszuhalten, der vom Gewichte der Säule a b herrührt. Man erkennt auch leicht, daß alle Theilchen, welche in einer zur Oberfläche parallelen Fläche liegen, nach allen Richtungen einen gleichen Druck erfahren.



Soll nun eine schwere Flüssigkeit im Gleichgewicht sein, so muß erstlich ihre freie Oberfläche rechtwinkelig zur Richtung der Schwere sein.

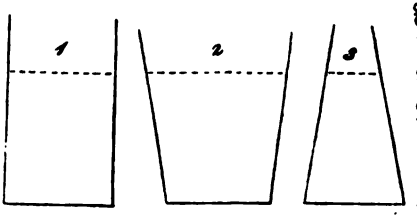
Fände dies nicht statt, so würde derjenige Theil der Flüssigkeit, welcher nicht rechtwinkelig zur Richtung der Schwere, sondern auf einer schiefen Ebene läge, wegen der leichten Verschiebbarkeit der Theilchen so lange von derselben herabgleiten müssen, bis jene Bedingung erfüllt wäre.

Die zweite Bedingung des Gleichgewichtes ergiebt sich ebenfalls sehr leicht aus der allgemeinen Eigenschaft tropfbarer Flüssigkeiten. Alle im Innern der Flüssigkeit enthaltenen Theilchen erleiden von den über ihnen befindlichen einen Druck, welchen sie nach allen Richtungen gleichmäßig fortpflanzen. Hieraus folgt von selbst, daß alle Drückungen, welche ein Theilchen von entgegengesetzten Seiten her erfährt, gleich sein müssen, wenn Gleichgewicht stattfinden soll.

81. Man habe irgend ein Gefäß mit verticalen Wänden und horizontalem Boden, das auf einer festen Ebene steht. Ist dasselbe von einer Flüssigkeit erfüllt, so muß der Boden das ganze Gewicht der Flüssigkeit tragen. Nennt man den Flächeninhalt des Bodens b, seine Entfernung von dem Spiegel h, so ist b . h der Rauminhalt der Flüssigkeit und b . h . s das Gewicht derselben, falls s ihre Dichtigkeit bezeichnet. Dies ist zugleich der Druck der Flüssigkeit auf den

Digitized by Google

Boden. Dieser Druck ist aber von der Gestalt des Gefäßes, sowie von der Menge der Flüssigkeit unabhängig und richtet sich nur nach der Flächengröße des horizontalen Bodens, der Höhe und dem specif. Gewichte der Flüssigkeit. So ist in den beigegebenen drei Gefäßen der Druck auf den Boden derselbe, sofern sich nur in allen dieselbe Flüssigkeit zu gleicher Höhe erhebt und der Boden gleichen Flächeninhalt besitzt. Dieser Druck ist bei allen gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, deren Grundfläche die des Gefäßes und deren Höhe die der Flüssigkeit ist. Man erkennt aber auch, daß der Bodendruck nur dann dem Gewichte der Flüssigkeit im Gefäße gleich ist, wenn dieses ein senkrechter Cylinder oder ein gerades Prisma ist. Der Druck ist geringer als dieses Gewicht, wenn das Gefäß (wie in 2) vom Boden nach oben hin an Breite zunimmt. Denn die verticalen Streifen der Flüssigkeit, welche vom Spiegel ausgehen und durch die Seitenwände unterbrochen werden, können auf den Boden des Gefäßes keinen Druck ausüben. Wird aber das Gefäß nach oben hin immer enger, so müssen die verticalen Fäden, welche vom Boden des Gefäßes ausgehen und durch die Seitenwände unterbrochen werden, eben so stark auf den Boden des Gefäßes drücken, als wenn sie sich bis zum Spiegel der Flüssigkeit erstreckten, weil das, was jedem dieser unvollständigen Streifen an Gewicht abgeht, durch den Widerstand der Wand, welche sie begrenzt, ersetzt wird. In diesem Falle wird also der Bodendruck größer als das Gewicht der Flüssigkeit sein.

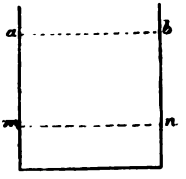


Daß der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf den Boden des Gefäßes ausübt, worin sie enthalten ist, von der Gestalt desselben wirklich unabhängig ist, läßt sich auch mittelst eines Apparates von Haldat bewahrheiten. Derselbe besteht im Wesentlichen aus einer gebogenen Röhre von ungleich langen Schenkeln; sie ist mit Quecksilber gefüllt und in einem Kasten befestigt. An ihrem kürzeren Schenkel können Gefäße von verschiedener Form aufgeschraubt werden. Die Flüssigkeit im Gefäße übt dann auf das Quecksilber in der Röhre einen Druck aus, dessen Größe durch den Stand des Quecksilbers im anderen Schenkel angezeigt wird. Auf diese Weise läßt sich leicht das oben Gesagte bestätigen.

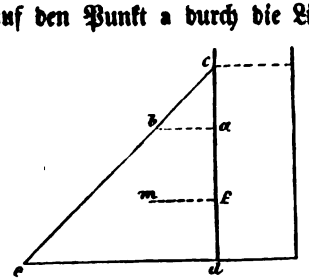
82. Wir wissen, daß nicht allein auf den Boden des Gefäßes, sondern auch auf jeden Theil im Innern der schweren Flüssigkeit ein

Digitized by Google

Druck ausgeübt wird, der von der Tiefe dieſes Theils unter dem Spiegel abhängt. Betrachten wir eine zum Spiegel parallele Schicht m n, ſo hat dieſe das Gewicht der Flüſſigkeitsſäule a b m n zu tragen.



Der Druck, welchen hierdurch die Theile dieſer Schicht auszuhalten haben, pflanzt ſich aber auch nach allen Seiten rechtwinkelig gegen die Gefäßwände fort, ſo daß der Punkt m der Wand demſelben Drucke ausgeſetzt iſt, als jeder Punkt der horizontalen Schicht m n. Bezeichnet man daher den Flächeninhalt eines Elements der Gefäßwand durch β, ſeine Tiefe unter dem Spiegel durch h, das ſpecif. Gewicht der Flüſſigkeit aber durch s, ſo iſt offenbar der Druck auf dieſes Element gleich $\beta . h . s$. Da der Druck, welchen ein Punkt der Seitenwand erleidet, von ſeiner Tiefe unter dem Niveau der Flüſſigkeit abhängt, ſo läßt ſich dieſer Druck durch eine gerade horizontale Linie darſtellen, deren Länge der Tiefe des Punktes unter dem Niveau gleich iſt. So iſt der Druck der Flüſſigkeit auf den Punkt a durch die Linie a b dargeſtellt, falls a b = a c iſt,



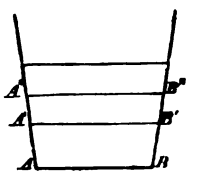
ebenſo der Druck auf den tiefſten Punkt d durch die Linie d e, ſofern letztere = d c iſt. Auf dieſe Weiſe ſieht man, daß die Drucklinien für alle Punkte der verticalen Linie d c durch die Linie e c begrenzt werden, und daß der Geſammtdruck auf die Linie d c der verticalen Gefäßwand durch das Dreieck c d e vorgeſtellt wird. Die Mittelkraft aller dieſer einzelnen Druckkräfte wird die Linie d c in einem ihrer Punkte treffen, den man den Mittelpunkt des Druckes nennt. Daß dieſer Punkt nicht mit dem Schwerpunkte der gedachten Linie zuſammenfallen kann, iſt leicht einzuſehen, da der Druck nach unten hin beſtändig wächſt; gewiß wird es aber der Punkt f ſein, in welchem die durch den Schwerpunkt m des Dreiecks gehende Horizontale die Linie d c trifft. Seine Entfernung vom Boden beträgt alſo $^1/_3$ der Höhe, bis zu welcher ſich die Flüſſigkeit im Gefäße erhebt.

Betrachtet man ſtatt der Linie d c einen verticalen Streifen der Gefäßwand, ſo muß der Mittelpunkt des Druckes auf der Mittellinie deſſelben in der genannten Höhe vom Boden liegen, und der Geſammtdruck auf dieſen Streifen wird gleich ſein dem Gewichte einer Flüſſigkeitsſäule, deren Baſis gleich iſt dem Flächeninhalt des Strei-

Digitized by Google

fens und deren Höhe gleich ist der Entfernung ihres Schwerpunktes oder, was dasselbe ist, des Mittelpunktes des Drucks vom Niveau der Flüssigkeit im Gefäße. Ebenso ist der Druck, welchen eine gleichartige Flüssigkeit auf eine geneigte ebene Wand ausübt, gleich dem Gewichte eines Prisma derselben Flüssigkeit, dessen Grundfläche diese Wand und dessen Höhe der Abstand seines Schwerpunktes (des Prisma) vom Spiegel der Flüssigkeit ist. Bei einem Gefäße mit horizontaler Grundfläche erleiden alle Punkte derselben einen gleichen verticalen Druck, so daß die Mittelkraft aller dieser parallelen Druckkräfte durch den Schwerpunkt der Grundfläche geht. Ist aber die Grundfläche des Gefäßes eine geneigte ebene Wand, so müssen ihre unteren Elemente einen stärkeren Druck erleiden, als ihre oberen, weshalb auch der Mittelpunkt des Druckes immer tiefer liegt, als der Schwerpunkt einer solchen Grundfläche.

83. Man habe ein Gefäß von nebenstehender Gestalt, in welchem sich eine im Gleichgewichte befindliche Flüssigkeit bis zur Höhe A′B′ erstreckt. Gießt man auf diese Flüssigkeit eine andere von der Dichtigkeit s′ und Höhe h′, so werden beide im Gleichgewicht sein, falls die Flächen A′B′ und A″B″ horizontal sind. Bezeichnet b′ den Flächeninhalt von A′B′, welches also die Grundfläche der zweiten Flüssigkeit ist, so übt letztere auf diese Grundfläche einen Druck aus, der bekanntlich gleich b′h′s′ ist. Dieser Druck pflanzt sich aber durch die untere Flüssigkeit bis zum Boden AB fort, und wenn der Flächeninhalt desselben b ist, so ist der wirkliche Druck der zweiten Flüssigkeit auf den Boden gleich bh′s′. Der Gesammtdruck, den diese beiden Flüssigkeiten auf den Boden ausüben, ist demnach $bhs + bh's' = b(hs + h's')$.



Gießt man in's Gefäß eine dritte Flüssigkeit von der Dichtigkeit s″ und Höhe h″, so bleibt das Gleichgewicht ungestört, wenn die Oberfläche A″B″ horizontal ist. Diese Flüssigkeit übt wieder auf ihre Grundfläche A″B″ einen Druck aus, welcher gleich b″h″s″ ist, sofern b″ den Flächeninhalt von A″B″ bezeichnet. Dieser Druck pflanzt sich durch die zweite Flüssigkeit fort und wird gleich h′h″s″ auf A′B′, und vermittelst der untersten Flüssigkeit gleich bh″s″ auf dem Boden des Gefäßes. Der ganze Druck dieser drei Flüssigkeiten auf den Boden ist also gleich

$$bhs + bh's' + bh''s'' = b(hs + h's' + h''s'').$$

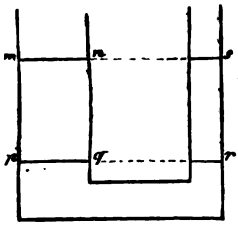
Auf diese Weise kann man fortfahren und man wird bemerken,

Digitized by Google

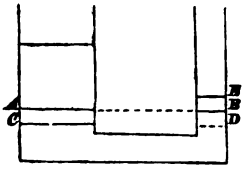
daß, wenn eine beliebige Anzahl verschiedener Flüssigkeiten in einem Gefäße übereinander gelagert und im Gleichgewichte ist, der Druck, welchen sie zusammen auf den horizontalen Boden ausüben, nur von dem Flächeninhalte desselben, von den Höhen dieser verschiedenen Flüssigkeiten und von ihren specif. Gewichten abhängt. Dieser Druck ist aber nur dann der Summe der Gewichte aller dieser Flüssigkeiten gleich, wenn das Gefäß ein senkrechter Cylinder oder ein gerades Prisma ist. Auch findet nur dann dauerndes Gleichgewicht statt, wenn die dichteren Flüssigkeiten den unteren Raum des Gefäßes einnehmen, damit der Schwerpunkt des ganzen Systems so tief als möglich liege.

Das obige Resultat gilt auch noch, wie leicht zu erkennen, wenn die Schichten der verschiedenen Flüssigkeiten unendlich dünn sind oder, was dasselbe ist, wenn sich die Dichtigkeit der flüssigen Masse stetig in verticalem Sinne ändert.

84. Befindet sich eine gleichartige Flüssigkeit in verschiedenen Gefäßen, welche mit einander verbunden sind, d. h. gewöhnlich in communicirenden Gefäßen, so muß für den Fall des Gleichgewichtes der Spiegel in beiden gleich hoch sein. Denn denkt man sich in dem einen Gefäße eine feste horizontale Scheidewand p q, so ist der Druck, welchen diese Wand von unten her erleidet, nach dem Principe der gleichmäßigen Fortpflanzung des Drucks nach allen Seiten, bekanntlich Bh, wenn B den Flächeninhalt derselben und h die Höhe r s bezeichnet.



Ist aber m n der Spiegel der Flüssigkeit im weiteren Gefäße, die Höhe p m = h′, so ist der Druck auf die Scheidewand von oben nach unten gleich Bh′. Denkt man sich jetzt die feste Scheidewand wieder weg und durch eine Flüssigkeitsschicht ersetzt, so hat diese von entgegengesetzten Seiten her dieselben Pressungen wie jene auszuhalten. Gleichgewicht kann nur bestehen, wenn Bh = Bh′, d. h. h = h′, oder wenn der Spiegel der Flüssigkeit in beiden Gefäßen gleich hoch ist, was zu beweisen war.



Ist das nebenstehende Gefäß zum Theil mit Quecksilber gefüllt, so wird nach dem Vorstehenden Gleichgewicht vorhanden sein, sobald die Quecksilberflächen A und B in einer und derselben Horizontalebene liegen. Wird nun in den einen Schenkel des Ge-

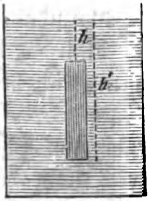
Digitized by Google

ſäßes auf das Queckſilber irgend eine andere Flüſſigkeit von geringerem ſpecif. Gewicht, z. B. Waſſer gegoſſen, ſo muß das Queckſilber vermöge des Waſſerdrucks auf die Fläche A in dieſem Schenkel ſinken, etwa bis C, in dem anderen aber ſteigen, z. B. bis E.

Liegen die Queckſilberflächen C und D in derſelben Horizontalebene, und bezeichnet man den Flächeninhalt des Röhrenquerſchnittes bei C durch b, die Höhe der Waſſerſäule durch h, die Höhe der Queckſilberſäule DE durch h', das ſpecif. Gewicht des Waſſers und des Queckſilbers resp. durch s und s'; ſo iſt der Druck der Waſſerſäule von oben nach unten auf C bekanntlich gleich bhs, derjenige der Queckſilberſäule auf dieſelbe Ebene von unten nach oben aber gleich bh's'. Für den Fall des Gleichgewichts iſt alſo bhs = bh's' oder h : h' = s' : s. D. h. wenn zwei ungleichartige Flüſſigkeiten in communicirenden Gefäßen im Gleichgewichte ſind, ſo müſſen ſich die Höhen der Flüſſigkeitsſäulen, welche über den durch dieſelbe Horizontalebene gemachten Durchſchnitten dieſer Gefäße ſtehen, umgekehrt verhalten wie ihre ſpecifiſchen Gewichte. Dies gilt allgemein, wie viele ungleichartige Flüſſigkeiten ſich auch in beiden Gefäßen befinden mögen. Bezeichnet man daher die Dicken der einzelnen Flüſſigkeiten in dem einen dieſer Gefäße durch h, h', h'', h''', ..., ihre ſpecif. Gewichte durch s', s'', s''', ..., und durch H, H', H'', H''', ... S, S', S'', S''', ... die entſprechenden Größen für die Flüſſigkeiten in dem anderen Gefäße, ſo hat man allgemein für das Gleichgewicht dieſer verſchiedenen Flüſſigkeiten die Gleichung

$$hs + h's' + h''s'' + h'''s''' + ... = HS + H'S' + H''S'' + H'''S''' + ...$$

85. Befindet ſich ein fremder Körper in einer Flüſſigkeit, ſo wiſſen wir aus dem Früheren, daß er von allen Seiten her einen Druck aushalten muß, gerade ſo wie die Flüſſigkeit, deren Platz er eingenommen hat. Um die Wirkung des Drucks der umgebenden Flüſſigkeit auf einen eingetauchten Körper kennen zu lernen, betrachte man ein gerades Prisma in einem Gefäße voll Flüſſigkeit. Nun ſieht man leicht, daß ſich die Preſſungen, welche die Flüſſigkeit auf die Seitenflächen dieſes Prisma ausübt, gegenſeitig aufheben müſſen, weil ſie einander gleich ſind und in entgegengeſetzten Richtungen wirken. Von oben nach unten erleidet aber das Prisma einen Druck durch eine Flüſſigkeitsſäule, welche die obere Fläche des Prisma zur Baſis und die ſenkrechte Entfernung h dieſer letzteren vom Spiegel zur Höhe hat. Dieſer Druck iſt alſo gleich bhs, wenn b jene Baſis und s wieder



Digitized by Google

das specif. Gewicht der Flüssigkeit bezeichnet. Aber auch von unten nach oben hat das Prisma einen Druck auszuhalten, welcher gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule von derselben Basis und der Höhe h' ist; denn wir wissen, daß der allseitige Druck in einer horizontalen Flüssigkeitsschicht, die hier auch durch die Grundfläche des Prisma geht, von ihrer Tiefe unter dem Spiegel abhängt. Dieser letztere Druck wird also gleich b h' s sein, mithin der Unterschied dieser entgegengesetzten Pressungen — b h' s — b h s — b s (h' — h), d. h. gleich der Höhe des Prisma. Hieraus folgt, daß der Druck auf die obere Fläche des Prisma von dem auf die untere um das Gewicht einer Flüssigkeitssäule übertroffen wird, die mit dem Prisma gleichen Rauminhalt hat. Es wird also das Prisma durch diesen Ueberschuß des aufwärts gerichteten Druckes im Gleichgewicht erhalten, und von der Flüssigkeit ein Theil seines Gewichts getragen, welcher dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit gleich ist. Jener Ueberschuß wirkt vertical von unten nach oben der Schwere gerade entgegen und vermindert deshalb auch das Gewicht um so viel, als das Gewicht der aus der Stelle vertriebenen Flüssigkeit beträgt.

Dieses Gesetz gilt allgemein, da man sich jeden Körper in verticale prismatische Elemente zerlegt denken kann, von denen jedes so viel an Gewicht verliert, als das Gewicht eines gleichen Volumens Flüssigkeit beträgt, so daß also auch der Gewichtsverlust des ganzen aus solchen Elementen zusammengesetzten Körpers gleich ist dem Gewicht einer flüssigen Masse, deren Volumen dem Volumen aller dieser Prismen, d. h. dem Volumen des ganzen Körpers gleich ist.

Hiernach wirken auf einen in eine Flüssigkeit getauchten Körper zwei Kräfte im entgegengesetzten Sinne. Einmal vertical abwärts die Schwere oder das Gewicht des Körpers, das man sich in seinem Schwerpunkt vereinigt denken kann, dann der Druck der Flüssigkeit vertical von unten nach oben, dessen Angriffspunkt im Schwerpunkte der aus ihrer Stelle verdrängten Flüssigkeit liegt.

86. Wird irgend ein fester Körper in eine Flüssigkeit getaucht, so können drei Fälle vorkommen, je nachdem sein specif. Gewicht größer, gleich oder kleiner, als das der Flüssigkeit ist. Ist das Gewicht des Körpers im leeren Raume P, das der Flüssigkeit bei gleichem Volumen p, so ist sein Gewicht in der Flüssigkeit P—p. Hat man nun P > p, so sinkt der Körper in der Flüssigkeit zu Boden, ist P — p, so schwebt er in ihr wie eine gewichtlose Masse; ist aber

Digitized by Google

$P < p$, ſo ſteigt er in die Höhe, bis das Gewicht der Flüſſigkeit, welche er verdrängt, ſeinem ganzen Gewichte gleich iſt.

Es iſt nun hiernach leicht, die Bedingungen des Gleichgewichts untergetauchter und ſchwimmender Körper zu beſtimmen.

Iſt ein gleichartiger Körper in einer Flüſſigkeit (z. B. Waſſer) untergetaucht, ſo wird er ſich in derſelben ſchwebend erhalten, wenn ſein ganzes Gewicht dem Gewichte der aus der Stelle vertriebenen Flüſſigkeit vollkommen gleich iſt. Der Schwerpunkt des Körpers fällt dann mit dem Schwerpunkte der vertriebenen Waſſermaſſe zuſammen und das Gleichgewicht findet in jeder Lage ſtatt.

Iſt aber der untergetauchte Körper ungleichartig, ſo fällt ſein Schwerpunkt nicht mehr mit dem Schwerpunkte der vertriebenen Waſſermaſſe zuſammen, obſchon er noch in der Flüſſigkeit ſchweben kann, wenn ſein ganzes Gewicht dem Gewichte der aus der Stelle verdrängten Flüſſigkeit gleich iſt. Eigentliches Gleichgewicht findet aber nur dann ſtatt, wenn ſein Schwerpunkt und der Schwerpunkt der vertriebenen Waſſermaſſe in derſelben Verticalen liegen, wobei noch der Schwerpunkt des Körpers die tiefſte Lage haben muß, wenn das Gleichgewicht dauernd ſein ſoll. Denn wir wiſſen, daß ein in eine Flüſſigkeit eingetauchter Körper der Wirkung zweier Kräfte unterworfen iſt. Die erſte Kraft iſt die Schwere, welche von oben nach unten auf den Körper wirkt, deren Angriffspunkt alſo der Schwerpunkt des Körpers iſt; die zweite Kraft iſt der Druck der vertriebenen Flüſſigkeitsmaſſe von unten nach oben und ihr Angriffspunkt iſt der Schwerpunkt dieſer Maſſe. Dieſe beiden Kräfte wirken im verticalen Sinne einander entgegen. Liegt nun der Schwerpunkt des Körpers vertical über dem der verdrängten Flüſſigkeitsmaſſe, ſo ſieht man wohl, daß Gleichgewicht ſtattfindet, aber nur ſo lange, als der Körper nicht aus dieſer Lage, ſei es auch noch ſo wenig, verrückt wird; denn ſobald dies geſchieht, muß ſich bekanntlich vermöge der Einwirkung der Schwere der Körper ſo lange drehen, bis ſein Schwerpunkt die tiefſte Lage erreicht hat, wodurch das Gleichgewicht ein dauerndes wird. So iſt z. B. das Gleichgewicht der Fiſche im Waſſer vermöge ihrer Schwimmblaſe ein dauerndes, weil dieſe ſtets eine ſolche Lage in ihrem Körper hat, daß der obere Theil deſſelben leichter wird und der Schwerpunkt des Ganzen in den unteren Theil zu liegen kommt. Außerdem dient die Schwimmblaſe den Fiſchen noch, um ſich im Waſſer zu heben oder ſinken zu laſſen. Denn durch den Druck der umgebenden Muskeln kann die Blaſe mehr oder weniger zuſammenge-

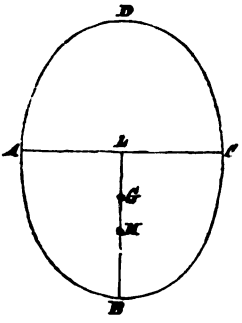
Digitized by Google

drückt werden, wodurch ihr Volumen mehr oder weniger verkleinert, die darin enthaltene Luft also auch mehr oder weniger dicht wird.

87. Schon im vorigen §. haben wir gesehen, daß sich ein schwimmender Körper in einer Flüssigkeit, deren specif. Gewicht größer als sein eigenes ist, nur theilweise einsenken kann. Nennt man V das Volumen des Körpers, p sein absolutes, s sein specif. Gewicht, v das Volumen des eingetauchten Theiles des Körpers, s′ das specif. Gewicht der Flüssigkeit, welches der Annahme gemäß größer ist, als das des Körpers, so hat man bekanntlich $p = Vs$ und auch $p = vs'$, also $Vs = vs'$ oder $v : V = s : s'$, nämlich das Volumen des eingetauchten Theiles verhält sich zum Volumen des ganzen Körpers wie das specifische Gewicht des Körpers zu dem der Flüssigkeit.

Bringt man einen und denselben Körper nach einander in zwei verschiedene Flüssigkeiten, deren specif. Gewichte beziehungsweise s und s′ sind, so ist gleichfalls, wenn man den eingetauchten Theil des Körpers in der einen Flüssigkeit durch v, in der anderen durch v′ bezeichnet, $p = vs$ und $p = v's'$, und hieraus $vs = v's'$ oder $v : v' = s' : s$. Die in verschiedenen Flüssigkeiten eingetauchten Theile Eines Körpers verhalten sich also umgekehrt wie die specif. Gewichte. Demnach wird ein Körper in einer leichteren Flüssigkeit tiefer einsinken, als in einer schwereren.

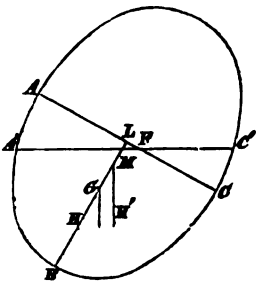
88. Wir wissen, daß ein Körper in einer Flüssigkeit schwimmt, wenn sein Totalgewicht gleich ist der Flüssigkeitsmasse, welche sein eingetauchter Theil verdrängt, und daß er im Gleichgewicht schwebt, wenn sein Schwerpunkt und der Mittelpunkt des aufwärts gehenden Druckes in einer Verticallinie liegen. Damit dieses Gleichgewicht dauernd sei, ist es jedoch nicht, wie bei untergetauchten Körpern, nothwendig, daß sein Schwerpunkt unter dem Mittelpunkte des Druckes liegt.



Sei ADCB der Querschnitt eines schwimmenden Körpers, ABC der eingetauchte Theil, so daß AC eine Linie ist, welche mit dem Spiegel der Flüssigkeit in einerlei Ebene liegt. Der Schwerpunkt des Körpers sei in G, der der verdrängten Flüssigkeit in H. Man nehme nun an, der Körper (welcher hinsichtlich der Linie BL symmetrisch sein mag) werde um etwas aus seiner Gleichgewichtslage ent-

Digitized by Google

fernt und dann sich selbst überlassen. In der neuen Lage bezeichne A′C′ den Spiegel der Flüssigkeit; der Theil CFC′ ist in die Flüssigkeit eingedrungen, während AFA′ herausgetreten ist; beide Theile werden einander gleich sein. Man sieht leicht, daß bei dieser Veränderung das Volumen der durch den Körper verdrängten Flüssigkeit dasselbe geblieben ist, woraus folgt, daß das Gewicht dieses Volumens der Flüssigkeit dem des Körpers gleich ist, wie in der Lage des Gleichgewichts. Der Schwerpunkt der verdrängten Flüssigkeit wird aber jetzt nicht mehr in H, sondern etwa in H′ liegen, während der Schwerpunkt des Körpers eine unveränderliche Lage hat. Beide Schwerpunkte befinden sich also nicht mehr, wie im Zustande des Gleichgewichtes, in derselben Verticallinie. Zieht man durch den Punkt H′ eine Verticale, so wird diese die Linie BL im Punkte M schneiden. Nun wirkt das Gewicht des Körpers in seinem Schwerpunkte G vertical abwärts, während der Druck der verdrängten Flüssigkeit vertical aufwärts gegen den Punkt M hinwirkt. Liegt der Schwerpunkt des Körpers unter dem Punkte M, so ist es gewiß, daß die genannten zwei Kräfte den Körper in seine anfängliche Gleichgewichtslage zurückdrehen werden. In diesem Falle ist also das Gleichgewicht dauernd. Wenn aber der Schwerpunkt G über M liegt, so findet dies nicht statt, sondern der von unten nach oben wirkende Wasserdruck wird den Körper mit Hilfe seines Gewichts noch mehr aus der Gleichgewichtslage entfernen, so daß er seine Stabilität vollständig verliert, indem er ganz umschlägt, um die obige Bedingung eines stabilen Gleichgewichts zu erfüllen. Den Punkt M nennt man das Metacentrum. Uebrigens sieht man, daß ein Körper um so stabiler schwimmen wird, je tiefer sein Schwerpunkt liegt und je breiter sein eingetauchter Theil ist. Die Lage des Metacentrums hängt bei einem Schiffe von der Gestalt desselben ab, die Lage des Schwerpunktes aber vorzugsweise von der Vertheilung der Ladung.



89. Selbst Körper, die von Natur specif. schwerer sind, als irgend eine Flüssigkeit, können in ihr zum Schwimmen gebracht werden, wenn man sie aushöhlt oder mit Körpern verbindet, die specif. leichter sind, als die gegebene Flüssigkeit.

Wir wollen beispielsweise das Gewicht bestimmen, welches man von einem specif. leichteren Körper nehmen muß, um einen specif.

Digitized by Google

ſchwereren in einer gegebenen Flüſſigkeit zum Schwimmen zu bringen. Sei das abſolute Gewicht des letzteren Körpers P, ſein ſpecif. S, die entſprechenden Größen für den erſteren p, s, und das ſpecif. Gewicht der Flüſſigkeit σ. Nun wird jedenfalls das Schwimmen ſtattfinden, wenn das Geſammtgewicht der verbundenen Körper gleich iſt dem Gewicht der verdrängten Flüſſigkeit, d. h. wenn

$$\left(\frac{P}{S} + \frac{p}{s}\right)\sigma = P + p,$$

woraus ſich ergiebt $$p = \frac{P\,s\,(S - s)}{S\,(\sigma - s)}.$$

Eben ſo leicht läßt ſich die Maſſe beſtimmen, welche man aus einer ſoliden Kugel herausnehmen muß, um ſie in einer ſpec. leichteren Flüſſigkeit ſchwimmen zu machen.

90. Das in §. 85 entwickelte, ſogenannte Archimediſche Princip bietet uns ein bequemes Mittel zur Beſtimmung des ſpecif. Gewichts der Körper dar. Zunächſt die hydroſtatiſche Wage. Hierzu kann jede gute Schalwage benutzt werden, wenn man eine Wagſchale kürzer hängt und unten mit einem Häkchen verſieht, an welches der betreffende Körper zu befeſtigen iſt. Legt man nun auf die andere Wagſchale Gewichte, ſo erfährt man das abſolute Gewicht P des Körpers. Taucht man ihn alsdann in Waſſer, ſo muß man zur Herſtellung des Gleichgewichts von dem Gewicht P wieder einen Theil p wegnehmen, welcher bekanntlich das Gewicht eines gleichen Volumens Waſſer iſt. Hiernach hat man ſofort für das ſpecif. Gewicht eines feſten Körpers $s = \frac{P}{p}$. Sollte ſich der zu beſtimmende Körper im Waſſer auflöſen, ſo wählt man eine andere paſſende Flüſſigkeit und verfährt auf dieſelbe Weiſe. Nur muß man, wie leicht zu begreifen, das Reſultat noch mit dem ſpecif. Gewichte dieſer Flüſſigkeit multipliciren, ſo daß man allgemein für irgend eine andere Flüſſigkeit als Waſſer hat: $S = \frac{P}{p} \cdot s$.

91. Außer der Wage gebraucht man zu demſelben Zwecke die Aräometer, von denen wir zunächſt das Nicholſon'ſche betrachten wollen. Dieſes Aräometer beſteht aus einem hohlen Körper a von Glas oder Metall, welcher unten ein Körbchen und eine ſchwere Maſſe b trägt; die letztere bezweckt, daß das Inſtrument in einer Flüſſigkeit mit Stabilität ſchwimmt. Oben trägt es auf

Digitized by Google

dem feinen Halſe einen Teller zur Aufnahme von Gewichten. Hat man nun einen Körper, deſſen ſpecif. Gewicht beſtimmt werden ſoll, ſo legt man ihn zuerſt auf den Teller, wodurch das Inſtrument tiefer einſinkt, und mit Hilfe von Tarirgewichten kann man es leicht dahin bringen, daß es ſich genau bis zu einem beſtimmten Punkte einſenkt, welcher am Halſe durch einen Feilſtrich bezeichnet iſt. Nimmt man jetzt den Körper weg und legt ſo viel Gewicht auf, daß das Inſtrument wieder bis zu jenem Punkte einſinkt, ſo erhält man hierdurch das abſolute Gewicht P des Körpers. Nachdem dies geſchehen, nimmt man die Gewichte vom Teller weg und legt den Körper in das erwähnte Körbchen. Ohne Zweifel würde das Inſtrument wieder bis zum Feilſtrich einſinken, wenn nicht der Körper im Waſſer an Gewicht verlöre. Deshalb muß man noch ein Gewicht p auf den Teller legen, damit das Inſtrument gerade bis zum Feilſtrich eintaucht. Das ſpec. Gewicht des Körpers iſt alſo $s = \frac{P}{p}$, da p das Gewicht eines gleichen Volumens Waſſer iſt.

Soll das Inſtrument zur Beſtimmung des ſpecif. Gewichts von Flüſſigkeiten dienen, ſo muß man ſein Gewicht P′ ein für allemal kennen; p′ ſei das Gewicht, welches auf den Teller gelegt werden muß, damit die Einſenkung wieder bis zur Marke ſtattfinde. Dann iſt P′ + p′ das Gewicht der verdrängten Waſſermaſſe. In einer anderen Flüſſigkeit wird ein anderes Gewicht p″ nöthig ſein, damit das Inſtrument wieder bis zum Feilſtrich einſinkt; p″ wird größer oder kleiner als p′ ſein, je nachdem die Flüſſigkeit ſchwerer oder leichter als Waſſer iſt. Nun iſt das Gewicht der verdrängten Flüſſigkeit P′ + p″, ihr Volumen aber gleich dem Volumen der Waſſermenge, deren Gewicht nach dem Obigen P′ + p′. Folglich das ſpecif. Gewicht der Flüſſigkeit

$$\frac{P' + p'}{P' + p''}.$$

Um ſchneller das ſpecif. Gewicht von Flüſſigkeiten zu beſtimmen, bedient man ſich der ſogenannten Scalenaräometer. Ein Scalenaräometer beſteht gewöhnlich aus einer cylindriſchen Röhre von Glas, welche ſich unten erweitert, wie die Figur zeigt. Die untere Kugel enthält etwas Queckſilber, damit das Inſtrument aufrecht ſchwimme. Im Waſſer iſt das Gewicht des Inſtrumentes dem Gewichte des verdrängten Waſſers gleich. Taucht man daſſelbe in eine andere Flüſſigkeit, ſo wird es mehr oder weniger tief einſinken,

Digitized by Google

je nachdem die Flüssigkeit leichter oder schwerer als Wasser ist. Ist nun das Instrument mit einer zweckmäßigen Scala versehen, so kann man aus einer einzigen Beobachtung leicht das specif. Gewicht einer Flüssigkeit bestimmen, wenn man sich den Theilstrich bemerkt, bis zu welchem das Instrument in die Flüssigkeit eingetaucht ist. Die einfachste und zweckmäßigste Scala rührt von Gay-Lussac her. Zunächst bemerkt man sich an der Röhre denjenigen Punkt, bis zu welchem das Instrument in Wasser einsinkt. Von diesem Punkte an bringt man auf der Röhre eine Reihe von Theilstrichen so an, daß das Volumen eines Röhrenstücks zwischen je zwei solchen Theilstrichen $\frac{1}{100}$ von dem in Wasser einsinkenden Volumen ist. Beträgt z. B. das Volumen des im Wasser untergetauchten Theils des Aräometers 10 Kubikcentimeter, so wird das Volumen des Röhrenstücks, welches zwischen je zwei Theilstriche fällt, 0,1 Kubikcentimeter betragen.

Man zählt die Theilung von unten nach oben, und bezeichnet jenen Punkt, bis zu welchem das Aräometer in Wasser einsinkt, mit 100. Ein solches Aräometer nennt man auch Volumeter. Sinkt nun z. B. dieses Instrument in irgend einer Flüssigkeit bis zum Theilstrich 80 der Volumeterscala ein, so erfährt man dadurch, daß 80 Volumtheile dieser Flüssigkeit so viel wiegen, wie 100 Volumtheile Wasser; daher ist das specif. Gewicht dieser Flüssigkeit $\frac{100}{80} = 1{,}25$. Allgemein ist $s = \frac{100}{x}$, d. h. man erhält das specif. Gewicht irgend einer Flüssigkeit, wenn man die Zahl des Scalenpunktes, bis zu welchem das Instrument in die Flüssigkeit einsinkt, in 100 dividirt.

Wollte man ein Volumeter construiren, welches für alle Flüssigkeiten anwendbar wäre, so würde dies die Unbequemlichkeit einer sehr langen Röhre mit sich führen. Deshalb verfertigt man Instrumente, welche nur für leichtere, und solche, welche nur für schwerere Flüssigkeiten gebraucht werden. Bei den ersteren befindet sich der mit 100 bezeichnete Punkt, welcher dem specifischen Gewichte des Wassers entspricht, nahe am unteren, bei letzteren nahe am oberen Ende der Röhre. Durch Vermehrung oder Verminderung der Quecksilbermasse in der unteren Kugel kann man es leicht dahin bringen, daß das Instrument nahe bis zu dem mit 100 bezeichneten Punkt einsinkt. Ist das Instrument für schwerere Flüssigkeiten bestimmt, so liegt also der Punkt 100 am oberen Ende der Röhre. Durch Vermischung von Wasser und Weingeist erhält man leicht eine Flüssigkeit, deren specif.

Digitized by Google

Gewicht genau 1,25 ist, was mittelst der hydrostatischen Wage geprüft werden kann. Man taucht das Instrument in diese Flüssigkeit und merkt sich den Punkt, bis zu welchem es einsinkt. Nun entspricht nach dem Obigen das specif. Gewicht 1,25 dem Theilstrich 80 der Volumeterscala, mit welcher Zahl jener Punkt zu bezeichnen ist. Den Zwischenraum zwischen diesen Punkten (80 und 100) theilt man in 20 gleiche Theile und setzt die Theilung noch unterhalb des Punktes 80 fort. Für leichtere Flüssigkeiten befindet sich der Punkt 100 am unteren Ende der Röhre. Einen zweiten Punkt der Scala findet man, wenn man das Instrument in eine Mischung von Wasser und Weingeist taucht, dessen specif. Gewicht genau 0,8 ist. Das specif. Gewicht 0,8 entspricht aber dem Theilstrich 125 des Volumeters. Den Raum zwischen diesem Theilstrich und dem Punkte 100 theilt man in 25 gleiche Theile (125—100) und setzt diese Theilung gehörig fort.

Außer dieser Theilungsart giebt es noch andere, welche das specif. Gewicht unmittelbar angeben, aber sonst keine Vorzüge haben, nicht einmal den einer größeren Bequemlichkeit, da die angegebene Volumeterscala sich viel leichter anfertigen läßt.

Für häufig in der Praxis vorkommende Flüssigkeiten hat man besondere Aräometer construirt, welche dazu dienen, aus dem specif. Gewichte der Flüssigkeit ihr Mischungsverhältniß (Concentrationsgrad) kennen zu lernen. Zu den wichtigsten und bekanntesten gehört das Alkoholometer, dessen wir hier nur erwähnen wollen, und welches zur Bestimmung des Alkoholgehaltes einer Mischung von Wasser und Weingeist dient.

Zweites Kapitel.

Vom Gleichgewicht tropfbarer Flüssigkeiten in Beziehung auf Molecülarkräfte.

92. Es giebt eine Reihe von Erscheinungen, die ihren Grund in den Molecülarwirkungen zwischen festen und flüssigen Körpern und den einzelnen Theilchen der letzteren selbst haben. Taucht man z. B. ein enges Glasröhrchen in eine Flüssigkeit, welche die Röhrenwand benetzt, wie Wasser, so findet man, daß die Flüssigkeit innerhalb des Röhrchens höher steht, als außerhalb desselben. Wird aber die Röh-

Digitized by Google

renwand nicht von der Flüssigkeit benetzt, taucht man das Röhrchen z. B. in Quecksilber, so zeigt das letztere im Röhrchen einen tieferen Stand, als außer ihm. Auch bemerkt man noch, daß, wenn eine Flüssigkeit in einem engern Röhrchen aufsteigt, der Gipfel der flüssigen Säule immer hohl ist, indem er eine Halbkugel vom Durchmesser der Röhre bildet. Ist dagegen die Flüssigkeit im Röhrchen unter das Niveau der äußeren Flüssigkeit herabgedrückt, so hat der Gipfel der flüssigen Säule eine erhabene Gestalt. Thatsächlich sind diese Gestalten wesentlich mit der Hebung und Senkung verbunden, so daß die Differenzen des Niveaus von der Form des Gipfels der Flüssigkeit innerhalb der Röhren abhängen. Dies bestätigt sich sogleich, wenn man die innere Wandung eines solchen Röhrchens mit Fett überzieht und es dann in Wasser taucht; der Gipfel der flüssigen Säule nimmt nun im Röhrchen eine erhabene Gestalt an, gerade so, als wenn man ein reines Glasröhrchen in Quecksilber taucht. Offenbar sind diese Erscheinungen Resultate der Einwirkung des Materials der Röhre auf die Flüssigkeit und des Zusammenhanges unter den Theilchen der letzteren. Diese Einwirkung muß allenthalben stattfinden, wo Flüssigkeiten mit festen Körpern in Berührung kommen. Man nennt jene engen Röhrchen gewöhnlich Haarröhrchen und deshalb die Erscheinungen, welche sich mittelst derselben zeigen, Haarröhrchen- oder auch Capillarerscheinungen.

Uebrigens hängen diese Erscheinungen nicht von der Wanddicke, sondern unter sonst gleichen Umständen nur von dem inneren Durchmesser der Röhrchen ab. Dies sowohl, als auch der Umstand, daß sich die Erscheinung ändert, wenn die innere Röhrenwand mit der dünnsten Fettschicht überzogen ist, bezeugt die unmeßbar kleine Distanz, worin die Wand auf die Flüssigkeit wirkt.

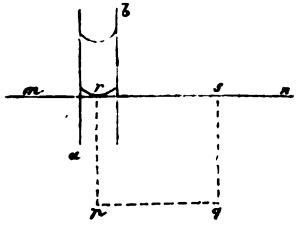
Die zwei Hauptkräfte, welche den besagten Erscheinungen zu Grunde liegen, sind also die Adhäsion und Cohäsion. Von beiden haben wir schon im §. 18 gesprochen. Beide zeigen sich überall, wo die kleinsten Theilchen der ponderabeln Materie einander berühren. Die Adhäsion ist, wie wir wissen, ein Anfang chemischer Einwirkung und zeigt sich zwischen den Massentheilchen ungleichartiger Körper, während die Cohäsion vorzugsweise zwischen den kleinsten Theilchen desselben Körpers wirksam ist. Setzt man eine feste Scheibe auf die Oberfläche einer Flüssigkeit, so muß man, um sie wieder in die Höhe zu ziehen, eine mehr oder weniger große Kraft anwenden. Um diese Kraft zu messen, kann man nach Taylor eine Wage gebrauchen, indem man an der einen Seite eine horizontale Scheibe anhängt, auf

Digitized by Google

der anderen aber ein Gewicht auflegt, welches sie im Gleichgewicht hält. Sobald dies stattfindet, nähert man der Scheibe von unten her die Oberfläche einer Flüssigkeit, so daß die letztere jene an der unteren Fläche berührt. Hierauf legt man behutsam auf der anderen Seite Gewichte auf, bis die Scheibe von der Flüssigkeit abreißt. Dieses Zulagegewicht ist nun nicht sowohl ein Maß für die Adhäsion zwischen der Scheibe und der Flüssigkeit, als vielmehr für die Cohäsion zwischen den Molecülen der Flüssigkeit selbst. Beim Aufziehen bleibt nämlich immer eine Schicht der Flüssigkeit an der Scheibe hängen, woraus folgt, daß man durch das Uebergewicht auf der anderen Seite nicht die Flüssigkeit von der Scheibe, sondern die Molecüle der Flüssigkeit von einander trennt.

93. Denken wir uns wieder ein Röhrchen in eine Flüssigkeit getaucht, wovon es benetzt wird, so werden die Röhrenwand und die ihr zunächst liegenden Theilchen der Flüssigkeit einander anziehen, dergestalt, daß eine dünne Schicht der Flüssigkeit an der Röhrenwand haftet. Diese dünne Schicht läßt sich selbst als eine Röhre betrachten, welche eine zweite, obgleich niedrigere, heraufzieht, die wieder eine dritte heben kann. Dies geht so fort, nur ist jede folgende Schicht niedriger, als die vorhergehende. Auf diese Weise steigt die Flüssigkeit an der Röhrenwand hinauf und bildet einen sogenannten concaven Meniscus.

Sei nun a b der Durchschnitt eines in Wasser vertical stehenden Röhrchens, m n die Oberfläche des Wassers. Man sieht leicht, daß jedes Theilchen mitten in der Flüssigkeit nach allen Seiten hin gleich starken Einwirkungen unterworfen ist, was nicht der Fall ist bei einem Theilchen, das auf der horizontalen Oberfläche der Flüssigkeit liegt, insofern es durch die unter ihm liegenden Theilchen angezogen wird, ohne eine gleiche Anziehung nach oben hin zu erleiden. Hieraus erwächst ein Druck nach unten hin, welcher die Wirkung der Schwere auf die einzelnen Flüssigkeitstheilchen verstärkt. Sobald nun das Röhrchen in's Wasser eingetaucht ist, wird sich auch nach dem früher Gesagten die Flüssigkeit rings am Rande erheben, wie die Figur andeutet. Das Theilchen r, der tiefste Punkt des Meniscus, liegt nun nicht mehr in einer horizontalen Ebene, sondern ist rings von höher gelegenen Theilchen umgeben, welche nach oben ziehen und damit den nach unten gerichteten Druck



Digitized by Google

der Theilchen unter r entgegenwirken. Denkt man sich unter r p q s einen engen Kanal, dessen Wände selbst aus Wasser bestehen, so sollte die Wassersäule r p der gleich hohen s q das Gleichgewicht halten. Weil aber die Wassertheilchen in s stärker niedergezogen werden und deshalb stärker auf die tiefer gelegenen drücken als die Wassertheilchen in r, so kann unmöglich Gleichgewicht bestehen, sondern die Wassertheilchen in r müssen steigen, bis dem Ueberschuß des Druckes in s durch das Gewicht der gehobenen Wassersäule das Gleichgewicht gehalten wird. Was von dem Theilchen r, gilt entsprechender Weise auch von jedem anderen Punkte des concaven Meniscus, woraus sich die Erhebung einer Wassersäule ergiebt, welche mit dem Röhrchen gleichen Durchmesser hat.

Diese Ansicht über die Erhebung einer Flüssigkeitssäule in einem Haarröhrchen geht ganz einfach aus der Natur der Sache selbst hervor; sie ist von Laplace zuerst bestimmt ausgesprochen und mathematisch behandelt worden.

Wenn sich eine tropfbare Flüssigkeit frei im Raume befindet und einem von allen Seiten her gleichen Druck unterworfen ist, so müssen sich alle Theilchen in Folge ihrer Beweglichkeit so ordnen, daß jedes nach allen Richtungen hin gleichen Einwirkungen ausgesetzt ist. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Masse die Gestalt einer Kugel hat. Gewöhnlich zeigen tropfbare Flüssigkeiten nur in kleinen Massen die Gestalt kugelförmiger Tropfen, da bei größeren Massen die unteren Theilchen durch den Druck der oberen zu einer Seitenbewegung veranlaßt werden. Auch die Adhäsion bewirkt stets eine Formveränderung tropfbarer Flüssigkeiten. Sobald aber jene Anordnung der Theilchen gestört wird, muß zwischen ihnen eine Spannung und demgemäß ein Streben entstehen, dieselbe wieder herzustellen. Es ist dies der Elasticität fester Körper ähnlich, doch modificirt durch die freie Beweglichkeit der Flüssigkeitstheilchen. Endigt die flüssige Masse mit einer Ebene, so ist immer noch jedes Molecül nach allen Seiten hin gleichen Einwirkungen unterworfen und daher die Lage der Molecüle, wie sie dem Gleichgewichte entspricht, nicht gestört; sobald aber die Masse vollkommen frei ist, nimmt sie die Gestalt einer Kugel an. Befindet sich in einer Glasröhre eine Flüssigkeit, welche jene nicht benetzt, z. B. Quecksilber, so bildet dieses einen cylindrischen Tropfen mit convexer Oberfläche. In diesem Falle kann die freie Oberfläche nicht horizontal sein, sondern muß sich der Kugelgestalt annähern; wäre sie für einen Augenblick wirklich horizontal, so müßten sich doch

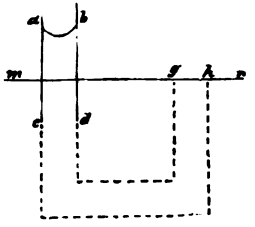
Digitized by Google

bald ihre scharfen Kanten wegen der hier stattfindenden Spannung und wegen der Beweglichkeit der Theilchen abflachen.

Taucht man ein enges Glasröhrchen vertical in Queckſilber, ſo muß es im Röhrchen tiefer ſtehen als außerhalb, weil der erhabene Theil des Queckſilbers die flüſſige Säule herabdrückt.

Man ſieht leicht ein, daß die Krümmung des Meniscus, mag er nun concav oder conver ſein, um ſo ſtärker ſein wird, je enger die Röhre iſt; deſto mehr Flüſſigkeitstheilchen können dann wirken und deſto bedeutender wird auch die Hebung oder Senkung über oder unter dem äußeren Niveau ſein.

94. Sei abcd wieder der Durchſchnitt eines vertical in Waſſer ſtehenden cylindriſchen oder prismatiſchen Haarröhrchens, mn die horizontale Oberfläche des Waſſers und ab die Oberfläche der im Röhrchen gehobenen Waſſerſäule. Nach dem Obigen ſind nun die Kräfte, welche die Säule heben, erſtlich die Anziehung P, welche die oberhalb ab gelegenen Wandtheile auf die benachbarten Waſſermolecüle ausüben; zweitens die Anziehung, welche das untere Ende cd des Röhrchens auf die unter ihm befindliche Waſſerſäule ausübt. Gewiß hat dieſe Anziehung mit der vorher erwähnten gleichen Werth. Dieſen Kräften wirken entgegen das Gewicht Q der Säule, dann die Anziehung P′, welche die unterhalb cd liegende Waſſerwand auf die über ihr ſtehende Waſſerſäule äußert. Außerdem erkennt man, daß alle übrigen Anziehungen in Rückſicht auf die innerhalb des Kanals abcdgh liegenden Waſſertheilchen ſich gegenſeitig aufheben. Man hat demnach für das Gleichgewicht der Säule abcd die Bedingungsgleichung



$$P + P - P' + Q \text{ oder } 2P - P' - Q.$$

Jedenfalls iſt die Kraft P dem Umfange des Querſchnittes der Röhre proportional, was nicht minder von der Kraft P′ gilt. Iſt daher dieſer Umfang gleich c, ſo hat man $P = pc$ und $P' = p'c$, wenn p, p′ zwei Factoren ſind, welche nur von der Materie des Rohres und der Flüſſigkeit abhängen. Bezeichnet man ferner den Flächeninhalt des Querſchnittes durch α, die Höhe der Säule abcd ohne Rückſicht auf den Meniscus durch h, das ſpecif. Gewicht der Flüſſigkeit durch s, ſo iſt das Gewicht der Säule $Q = \alpha hs$. Die erhaltenen Werthe in obige Gleichung ſubſtituirt geben $c(2p - p')$

Digitized by Google

$= \alpha h s$, woraus folgt $h = \frac{c\,(2p - p')}{\alpha s}$. Diese Formel gilt für jede Flüssigkeit, wenn man für s ihr specif. Gewicht setzt.

Aus ihr sieht man, daß h nur dann einen positiven Werth erhält, wenn $2p > p'$ oder wenn das Doppelte der Anziehung der Röhrenwand gegen die Flüssigkeitstheilchen mehr beträgt als die Anziehung dieser Theilchen unter einander. Also nur in diesem Falle, wo die Flüssigkeit die Röhrenwand benetzt, findet eine Erhebung statt. Hätte man $2p = p'$, so wäre $h = 0$, d. h. die Flüssigkeit würde sich so verhalten, als ob keine Molecülarwirkung zwischen ihr und der Röhrenwand stattfände. Ist aber $2p < p'$, d. h. ist die Cohäsion der Flüssigkeit größer als das Doppelte der Anziehung zwischen ihr und der Röhre, so bekommt h einen negativen Werth, was eine Senkung der Flüssigkeit andeutet.

Sei der Querschnitt des Röhrchens ein Kreis vom Durchmesser d, also das Röhrchen selbst ein Cylinder, dann ist bekanntlich $c = \pi d$, $\alpha = \frac{1}{4}\pi d^2$, daher $h' = \frac{4\,(2p - p')}{d} = \frac{A}{d}$, sofern man Kürze halber den Zähler des Bruches gleich A setzt. Nimmt man nun ein anderes Röhrchen von demselben Stoffe, aber verschiedenem Durchmesser d, so bleibt zwar der Werth von A unverändert, aber die Höhe der Säule ist jetzt $h = \frac{A}{d'}$. Aus beiden Ausdrücken entsteht die Proportion $h : h' = d' : d$, d. i. die Höhen der gehobenen oder herabgedrückten Säulen verhalten sich bei sonst gleichen Umständen umgekehrt wie die Durchmesser der Röhren.

Wir wollen hier noch bemerken, daß man den Durchmesser eines cylindrischen Haarröhrchens leicht und sicher bestimmen kann, wenn man es zuerst leer wägt, dann eine beliebig lange Quecksilbersäule hineinbringt und nochmals sein Gewicht bestimmt. Aus der Differenz beider Wägungen ergiebt sich das Gewicht q der Quecksilbersäule. Ist nun die Länge der Säule l und das specif. Gewicht des Quecksilbers s, so hat man bekanntlich $\frac{1}{4}\pi l s x^2 = q$, woraus man leicht den Durchmesser des Röhrchens erfährt, nämlich $x = 2\sqrt{\frac{q}{\pi l s}}$.

Um die Höhe der Flüssigkeitssäule in einem Haarröhrchen genau zu messen, bedient man sich zweckmäßig eines Verfahrens von Gay-Lussac. In einer etwas weiten Glasröhre, die auf einem Fuße mit Stellschrauben ruht, befindet sich bis zu einer gewissen Höhe die betreffende Flüssigkeit. Das Haarröhrchen reicht durch ein Plättchen,

Digitized by Google

welches auf dem Rand des Glasgefäßes liegt, in die Flüſſigkeit. In einiger Entfernung von dieſem Apparate wird vertical ein getheilter Stab aufgeſtellt, an welchem ſich ein Fernrohr mit einer Mikrometerſchraube auf- und niederſchieben läßt. Man ſtellt nun das Fernrohr zuerſt ſo ein, daß der horizontale Theil ſeines Fadenkreuzes gerade den Gipfel der Flüſſigkeit im Röhrchen berührt. Hierauf rückt man die Platte mit dem Haarröhrchen an den Rand des Glasgefäßes und bringt an ihre Stelle ein anderes Plättchen, durch welches ein an ſeinem oberen Theile mit einem Schraubengewinde verſehenes Stäbchen geht. Dieſes Stäbchen dreht man ſo, daß ſeine untere Spitze gerade die Flüſſigkeit im Gefäße berührt. Nachdem der erſte Stand des Fernrohrs bemerkt iſt, rückt man daſſelbe ſo weit herunter, bis der horizontale Faden durch die unterſte Spitze des Stäbchens geht. Lieſ't man nun die Höhendifferenz dieſer beiden Stellungen des Fernrohrs am getheilten Stabe ab, ſo hat man die geſuchte Höhe der flüſſigen Säule im Haarröhrchen.

95. In einem ringförmigen Raume iſt die Höhe der gehobenen oder herabgedrückten Säule eben ſo groß wie in einem cylindriſchen Röhrchen, deſſen Halbmeſſer gleich iſt der Dicke des ringförmigen Raumes. Man erhält einen ſolchen ringförmigen Raum, wenn man in eine Röhre eine zweite ſo ſteckt, daß ihre Aren zuſammenfallen.

Bringt man einen Tropfen Waſſer in ein cylindriſches horizontal liegendes Röhrchen, ſo muß Gleichgewicht ſtattfinden, inſofern die Krümmungen der concaven Oberflächen an beiden Enden gleich groß ſind. Liegt aber der Tropfen in einem coniſchen Röhrchen, ſo muß nach dem Früheren in dem engeren Theile die Concavität bedeutender, alſo auch die nach dieſer Seite hinwirkende Anziehung ſtärker ſein als in dem anderen, weiteren Theile. Hieraus folgt, daß ſich das Waſſer nach dem engeren Theile hinbewegen wird.

Ein Tropfen Queckſilber in einem cylindriſchen horizontal liegenden Glasröhrchen muß im Gleichgewicht ſein, weil die Converitäten an beiden Enden gleich ſind. Iſt dagegen der Queckſilbertropfen in einem coniſchen Röhrchen, ſo hat die Converität im engeren Theile eine ſtärkere Krümmung als im anderen, alſo wird auch von dieſer Seite her ein ſtärkerer Druck auf das Queckſilber ſtattfinden als von der anderen Seite her. Deshalb bewegt ſich das Queckſilber nach dem weiteren Ende der Röhre hin. Füllt man ferner ein horizontal liegendes Röhrchen mit Queckſilber und läßt das eine Ende des Queckſilbercylinders mit einem Tropfen Queckſilber zuſammenfließen, ſo vergrößert ſich der Tropfen fortwährend, indem das Queckſilber

Digitized by Google

aus dem Röhrchen heraustritt und sich zuletzt ganz mit dem Tropfen vereinigt. Die Convexität an dem einen Ende des Queckſilbercylinders übt nämlich auf die ganze Maſſe einen größeren Druck aus als der Tropfen, daher die Vergrößerung des letzteren.

96. Taucht man ein prismatiſches Haarröhrchen in Waſſer, ſo läßt ſich die Höhe der gehobenen Säule leicht nach der im §. 94 entwickelten Formel für h berechnen. Sei der Querſchnitt des Prisma ein Rechteck von der Breite b und Dicke d, dann iſt bekanntlich der Umfang c = 2 (b + d), der Flächeninhalt des Querſchnittes aber a = bd, alſo nach dem erwähnten §. $h = \frac{1}{2} A \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{b}\right)$.

Hat man ſtatt eines prismatiſchen Röhrchens zwei einander parallele Platten, die in der Entfernung d einander gegenüberſtehen, ſo verſchwindet $\frac{1}{b}$ gegen $\frac{1}{d}$ und man erhält aus jener Formel $h = \frac{A}{2d}$. Es läßt ſich nämlich der zwiſchen zwei parallelen Platten befindliche Raum füglich als Theil eines ringförmigen Raumes von unendlich großem Durchmeſſer betrachten. Vergleicht man nun das erhaltene Reſultat mit dem für ein cylindriſches Haarröhrchen gefundenen, ſo zeigt ſich, daß die Höhe der zwiſchen zwei parallelen Platten gehobenen oder herabgedrückten Säulen die Hälfte derjenigen iſt, die man an einem cylindriſchen Haarröhrchen vom Durchmeſſer d beobachtet.

Taucht man zwei Glasplatten, welche ſich in einer verticalen Linie ſchneiden und einen Winkel mit einander machen, in Waſſer, ſo wird es längs der gemeinſchaftlichen Kante beider Platten in die Höhe ſteigen, dergeſtalt, daß der Gipfel des gehobenen Waſſers eine gleichſeitige Hyperbel bildet, deren Aſymptoten einerſeits die erwähnte Kante, andererſeits aber das Niveau des Waſſers iſt.

97. Schwimmen zwei hohle Glas- oder Korkkugeln auf Waſſer, ſo hebt ſich dieſes rings um dieſelben, und ſind ſie einander hinreichend nahe, ſo zieht ſie das zwiſchen ihnen befindliche Waſſer mit beſchleunigter Geſchwindigkeit gegeneinander, bis ſie endlich zuſammenſtoßen. Aehnliches beobachtet man an verticalen Platten.

Eben ſo bewegen ſich zwei Platten oder zwei Kugeln, welche von der Flüſſigkeit nicht benetzt werden, wie Wachskugeln auf Waſſer oder Glaskugeln auf Queckſilber, zu einander hin, indem ſie von der äußeren Flüſſigkeit gegeneinander gedrückt werden.

Zwei Kugeln endlich, von denen die eine benetzt wird, die andere aber nicht, entfernen ſich wegen der Krümmung der zwiſchen ihnen befindlichen Flüſſigkeit von einander.

Digitized by Google

Alle diese Erscheinungen zeigen aber, daß feste Körper und Flüssigkeiten nicht mit einander in Berührung kommen können, ohne daß die Oberfläche der Flüssigkeit eine mehr oder weniger merkliche Formänderung erleidet.

98. Zu den Capillarerscheinungen gehören größtentheils auch diejenigen, welche nach Dutrochet unter dem Namen der Endosmose und Exosmose bekannt sind. Ein Apparat, welcher besonders bequem ist, diese Erscheinungen deutlich zu zeigen, ist der Dutrochet'sche Endosmometer. Derselbe besteht aus einer langen Glasröhre, welche sich unten in Form eines Trichters erweitert und hier mit einer Haut verschlossen ist. Die Röhre ist graduirt und zeigt genau das Steigen und Fallen der darin enthaltenen Flüssigkeit. Füllt man den Endosmometer mit Weingeist und bringt ihn dann in ein Gefäß mit Wasser, so wird man nach einiger Zeit ein Steigen der Weingeistsäule bemerken, da ein Theil Wasser durch die Haut hindurch zum Weingeist übergetreten ist. Stellt man den Versuch in umgekehrter Ordnung an, d. h. füllt man den Endosmometer mit Wasser und das Gefäß mit Weingeist, so fällt das Wasser in der Röhre, während außerhalb das Niveau steigt. Doch findet stets ein doppelter Durchgang statt, obgleich verschieden an Stärke, denn die beiden Flüssigkeiten, sobald sie mit einander in Berührung gekommen, streben nach einer gleichförmigen Mischung mit einander. Die Anziehung beider Flüssigkeiten zu einander ist rein gegenseitig, insofern aber die poröse Haut die eine Flüssigkeit leichter durchläßt als die andere, muß das Niveau auf der einen oder anderen Seite steigen. Setzt man zu einer concentrirten wässerigen Auflösung eines Stoffes noch mehr Wasser hinzu, so vertheilt sich in ihm zufolge gegenseitiger Anziehung der Stoff gleichförmig. Taucht man den Endosmometer, nachdem man ihn mit einer concentrirten Lösung von Kupfervitriol gefüllt hat, in ein Gefäß mit Wasser, so bringt das Wasser allmälig durch die Blase in die Röhre, so daß in der letzteren die Flüssigkeit steigt, im Gefäße aber fällt. An der Färbung des Wassers erkennt man aber, daß zu ihm auch etwas von der Lösung des Kupfervitriols übergegangen ist. Die leichtere Beweglichkeit der Theilchen der einen oder anderen Flüssigkeit ist hier gewiß von Einfluß, so daß es im Allgemeinen den Anschein hat, als ob die dickere Flüssigkeit die weniger dicke anzöge. Je beweglicher die Theilchen einer Flüssigkeit sind, desto leichter können sie der Anziehung, welche von irgend einer Seite auf sie ausgeübt wird, Folge leisten.

Digitized by Google

Drittes Kapitel.

Vom Gleichgewicht der Gase, und von dem atmosphärischen Druck insbesondere.

99. Bei tropfbaren Flüssigkeiten findet nicht minder als bei festen Körpern ein Gleichgewicht der Attraction und Repulsion statt, nur mit dem Unterschiede, daß jedes Massentheilchen des Flüssigen noch freie Beweglichkeit nach allen Richtungen besitzt. Die Theilchen der ausdehnsamen Flüssigkeiten oder Gase werden nicht durch gegenseitige Attraction zusammengehalten, wir bemerken zwischen ihnen nur Repulsion, insofern sie das Bestreben äußern, sich immer weiter von einander zu entfernen. Vermöge dieses Strebens üben die Gastheilchen auf jeden Körper, welcher sich einer weiteren Verbreitung des Gases widersetzt, einen bestimmten Druck aus, z. B. wenn das Gas in einem Gefäße enthalten ist. Durch äußeren Druck kann das Volumen eines Gases bedeutend vermindert werden, sobald aber die zusammendrückende Kraft wegfällt, kehrt auch das Gas zu seinem ursprünglichen Volumen zurück. So läßt sich eine mit Luft gefüllte Blase leicht zusammendrücken, dehnt sich aber sogleich wieder aus, wenn der Druck nachläßt. Man nennt dies die Elasticität des Gases und diese ist eine nothwendige Folge der zwischen den einzelnen Gastheilchen bestehenden Repulsion.

100. Unter den gasförmigen Körpern ist die atmosphärische Luft einer der gewöhnlichsten und wichtigsten; man betrachtet sie insgemein als Repräsentanten aller Gase, da dieselben ungeachtet der materiellen Verschiedenheit alle physikalischen Eigenschaften (wenigstens innerhalb gewisser Grenzen) mit ihr gemein haben. Weil die Erde rings von der Luft umgeben ist, so muß diese auf alle Theile der ersteren, sowohl auf die festen als auch auf die flüssigen, einen bestimmten Druck ausüben, welcher sich leicht durch einen Versuch ermitteln läßt. Man fülle eine 30 Paris. Zoll lange, einige Linien weite und an dem einen Ende verschlossene Glasröhre mit Queckſilber, kehre sie dann um, indem man das offene Ende mit dem Finger verschließt, und tauche sie vertical in ein Gefäß, welches ebenfalls mit Queckſilber gefüllt ist. Sobald man den Finger wegzieht, sinkt das in der Röhre befindliche Queckſilber auf etwa 28 Paris. Zoll herab und bleibt in dieser Höhe über dem äußeren Niveau stehen. Man erkennt leicht, daß diese Erhebung nicht von einer Adhäsion zwischen Glas und Queckſilber herrühren kann, denn das letztere, sofern es nur rein ist, hat eine convexe Oberfläche und bildet in der Röhre einen freiliegenden

Digitized by Google

Tropfen. Wird die Glasröhre aber geöffnet, so fällt die Säule alsbald bis zum Niveau des Queckſilbers im Gefäße hinab. Die Erhebung des Queckſilbers in der Röhre kann alſo nur die Folge eines äußeren Druckes ſein, welcher von der Luft auf das Queckſilber im Gefäße ausgeübt wird. Daß die Erhebung der Flüſſigkeit in der Röhre nur von dieſem äußeren Drucke herrührt, geht auch daraus hervor, daß er unabhängig iſt von der materiellen Beſchaffenheit der Flüſſigkeit. Füllt man eine lange und hinreichend weite Röhre mit Waſſer anſtatt mit Queckſilber und taucht ſie dann auf die angegebene Weiſe in ein Gefäß mit Waſſer, ſo erhebt ſich in ihr eine ungefähr 32 Fuß hohe Waſſerſäule. Nun iſt Waſſer nahe 14 mal leichter als Queckſilber und hiernach beinahe 32′ = 28″. 14, woraus folgt, daß die Waſſerſäule in demſelben Verhältniſſe höher iſt, in welchem die Dichtigkeit des Waſſers geringer iſt als die des Queckſilbers. Der äußere Luftdruck ſteht alſo im erſten Falle mit einer 28 Pariſ. Zoll hohen Queckſilberſäule und im zweiten mit einer 32 Fuß hohen Waſſerſäule im Gleichgewicht. Dieſe Säulen ſtehen nun auch unter ſich im Gleichgewichte, in Uebereinſtimmung mit dem hydroſtatiſchen Satze, daß zwei ungleichartige Flüſſigkeitsſäulen ſich das Gleichgewicht halten, wenn ihre Höhen ſich umgekehrt wie die Dichtigkeiten verhalten. Man nennt die verticale Höhe des Niveau's in der Röhre über dem Niveau im Gefäße die Barometerhöhe. Dieſe Höhe iſt veränderlich, ſowohl an demſelben Orte als auch an verſchiedenen Orten; nur am Ufer des Meeres beträgt ſie durchſchnittlich 28 Pariſ. Zoll oder 76 Centimeter. Eine Queckſilberſäule von der angegebenen Höhe und von 1 Quadratcentimeter Grundfläche iſt an Rauminhalt gleich 76 Cubikcentimeter. Das Gewicht eines Cubikcentimeters Queckſilber iſt gleich 13, 59 Gramm, alſo das Gewicht jener Säule oder auch der Druck auf ihre Grundfläche gleich 13, 59. 76 Gramm = 1,033 Kilogramm. Dies iſt alſo auch der Druck einer atmoſphäriſchen Luftſäule auf 1 Quadratcentimeter der Erdoberfläche. Beſtimmt man die ganze Erdoberfläche und multiplicirt ihre Größe mit 1,033 Kilogramm, ſo erhält man das Gewicht der ganzen Luftmaſſe. Toricelli, ein Schüler Galilei's, war der Erſte, welcher den obigen Verſuch anſtellte, um den Luftdruck zu meſſen.

101. Eine zweckmäßig conſtruirte, mit Queckſilber gefüllte Glasröhre heißt ein Barometer, wenn ſie mit einer Scale zur Beobachtung des jedesmaligen Queckſilberſtandes verſehen iſt. Soll das Barometer ſeinem Zwecke entſprechen, ſo muß vor Allem das Queck-

Digitized by Google

silber rein sein, denn unrein hat es die Eigenschaft, am Glase zu haften. Das Reinigen des Queckſilbers kann dadurch geſchehen, daß man es wiederholt mit verdünnter Salpeterſäure ſchüttelt, oder noch beſſer, wenn man es einige Wochen lang mit der Säure in Berührung läßt. Durch wiederholtes Auswaſchen des Queckſilbers mit deſtillirtem Waſſer entfernt man die Säure wieder.

Dann muß auch der über dem Queckſilber befindliche Raum völlig luftleer ſein, denn nur in dieſem Falle zeigt das Barometer den richtigen Queckſilberſtand an. Bleibt etwas Luft in dieſem Raume zurück, ſo muß ihre Spannkraft die Queckſilberſäule niederdrücken. Um alle Luft aus dem Queckſilber zu entfernen, pflegt man das letztere gewöhnlich zu kochen. Man füllt nämlich die Röhre zum Theil mit Queckſilber und kocht es der Länge nach über einem Kohlenfeuer, dann gießt man eine neue Quantität Queckſilber, welches ſchon zum Theil erwärmt iſt, nach und kocht auch dieſes auf die angegebene Weiſe. So fährt man fort, bis die Röhre beinahe gefüllt iſt, und gießt endlich noch etwas heißes Queckſilber zur vollſtändigen Füllung der Röhre auf. Man bemerkt, daß durch dieſes Verfahren die Feuchtigkeit nicht minder als die Luft entfernt wird. Uebrigens muß man verhüten, daß während des Auskochens kein Queckſilberoxyd entſteht, wodurch ſich das Queckſilber an das Glas hängt. Kocht man das Queckſilber etwas lange, ſo wird man finden, daß die Queckſilberkuppe in der Röhre immer flacher wird und zuletzt ganz verſchwindet, was eben vom Anhaften des Queckſilbers am Glaſe vermöge des Oxyds herrührt. Dieſes Anhaften iſt beſonders bei engen Röhren zu befürchten, weshalb genaue Barometer eine gewiſſe Weite (5‴ — 6‴) haben müſſen. Sollte etwas Luft in der Toricelliſchen Leere zurückbleiben oder nach und nach eindringen, was faſt immer der Fall iſt, ſo iſt, wie leicht einzuſehen, der hieraus entſpringende Fehler um ſo geringer, je größer das Volumen des leeren Raumes iſt. Auch aus dieſem Grunde dürfen die Röhren nicht zu eng ſein.

Man hat dem Barometer verſchiedene Formen gegeben, welche dem Zwecke mehr oder weniger entſprechen. Das gewöhnlichſte Barometer iſt das ſogenannte Gefäßbarometer. Es beſteht aus einer cylindriſchen Röhre, welche unten gekrümmt iſt und ſich in einem weiteren Gefäße endigt. Iſt das Gefäß weit im Vergleich zum Durchmeſſer der Röhre, ſo kann man das Niveau des Queckſilbers im erſteren als conſtant anſehen, weil dann die Schwankungen der Säule nur von geringem Einfluſſe auf dieſes Niveau ſind.

Digitized by Google

Die Scale, welche zur Messung der Barometerhöhe dient, ist gewöhnlich von Metall und am oberen Ende der Röhre angebracht. Zu genauen Untersuchungen sind solche Barometer nicht geeignet. Zweckmäßiger ist das Fortin'sche Gefäßbarometer. Bei diesem bildet den Boden des Gefäßes ein Lederbeutel, gegen welchen von unten eine Schraube drückt. Der Quecksilberspiegel des Gefäßes läßt sich heben und senken, je nachdem man die Schraube dreht. Hierdurch erreicht man, daß das Quecksilber des Gefäßes stets ein constantes Niveau hat, wenn man nämlich durch Drehen der Schraube die Oberfläche des Quecksilbers mit der Spitze eines feinen Elfenbeinstiftes in Berührung bringt, welcher am Deckel des Gefäßes angebracht ist. Die Spitze des Stiftes entspricht stets dem Nullpunkte der Scale.

Zu den vollkommensten Barometern rechnet man das Heberbarometer, welches aus einer heberförmig gebogenen Röhre besteht, deren kürzerer Schenkel denselben Durchmesser hat wie der längere Schenkel oder doch wie der obere Theil desselben. Der Nullpunkt, von welchem aus die Höhe bestimmt wird, ist hier veränderlich. Man hat deshalb häufig an diesen Barometern verschiebbare Scalen, so daß der Nullpunkt der Theilung immer an die Stelle der unteren Quecksilberkuppe gerückt werden kann. Auf Reisen gebraucht man gewöhnlich das Gay-Lussac'sche Heberbarometer, welches leicht transportirt werden kann. Die Röhre ist so gebogen, daß der untere Schenkel in einer geraden Linie mit dem oberen Theil des längeren Schenkels liegt. Auf diese Weise kann man die Stellung beider Quecksilberkuppen auf einer und derselben geradlinigen Scale ablesen. Es ist übrigens nicht nöthig, daß die Scale verschiebbar ist, sie kann auch so eingerichtet sein, daß der Nullpunkt zwischen beiden Kuppen liegt. Man sieht dann nach, um wie viel die eine Kuppe über, die andere unter dem Nullpunkte liegt, beide Entfernungen summirt geben die Barometerhöhe. Das Gay-Lussac'sche Barometer hat nebenstehende Gestalt. Der untere Schenkel hat nur eine capillare Oeffnung, welche zwar die Luft frei ein- und ausläßt, aber zu klein ist, als daß das Quecksilber auslaufen könnte, weshalb man es ohne Gefahr umdrehen kann. —

Will man die Barometerhöhe genau messen, so muß die Röhre eine möglichst verticale Stellung haben. Auch muß sich das Auge beim Ablesen genau in der Höhe der Queck-

Digitized by Google

silberkuppe befinden, wenn nicht die Barometerhöhe zu hoch oder zu tief ausfallen soll, je nachdem das Auge über oder unter die Kuppe gehalten wird. Am sichersten beobachtet man die Quecksilberkuppe mittelst eines Mikroskopes.

Indessen hat W. Weber eine Scale angegeben, wodurch jener Uebelstand völlig beseitigt wird. Die Theilung befindet sich nämlich auf der Vorderseite eines Streifens von dickem Spiegelglase, dessen halbe Hinterseite der Länge nach wie bei einem Spiegel belegt ist. Von vorn betrachtet ist also die eine Hälfte des Glasstreifens durchsichtig, während die andere als Spiegel erscheint. Hinter diesem Glasstreifen ist nun das Barometerrohr so angebracht, daß seine Mittellinie gerade hinter der Grenzlinie des Spiegels liegt, daß man also nur die eine Hälfte der Quecksilbersäule sieht. Steht die Scale vertical, so ist der Punkt des Spiegels, in welchem der Beobachter das Bild seines Auges erblickt, genau in der Höhe des Auges selbst. Bemerkt man also das Bild des Auges gerade neben der Quecksilberkuppe, so hat das Auge die richtige Stellung, da es sich genau in der Höhe der Kuppe befindet. —

Um richtige Barometerbeobachtungen zu machen, muß man auch auf die Verminderung der Quecksilbersäule wegen der Capillarität und auf die Temperatur Rücksicht nehmen. Wir wissen nämlich, daß bei engen Röhren eine Capillardepression stattfindet, wodurch die Säule erniedrigt wird.

Bei Heberbarometern mit weiten Röhren ist in dieser Hinsicht keine besondere Correction nöthig, wenn die Schenkel in der Nähe der Quecksilberkuppen gleichen Durchmesser haben. Die Capillarität ist hier einmal wegen der Weite der Röhren sehr gering und dann auch wegen der Gleichheit der Durchmesser auf beiden Seiten nahe dieselbe. Auch bei einem Gefäßbarometer mit weiter Röhre ist die Capillarität ohne Einfluß. Bei engen Röhren muß man die Wirkung der Capillarität berechnen oder die beobachtete Barometerhöhe durch Vergleichung mit einem sogenannten Normalbarometer, bei welchem keine Capillardepression stattfindet, corrigiren.

Um verschiedene Barometerbeobachtungen mit einander vergleichen zu können, reducirt man sie alle auf dieselbe Temperatur, für welche man allgemein 0°C. annimmt. Zu diesem Zwecke stützt man sich

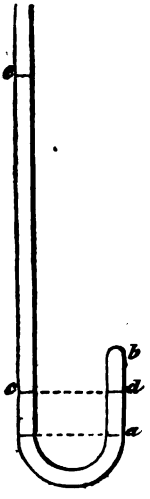
Digitized by Google

auf die Beobachtung, daß eine Queckſilberſäule, welche man bei 0°C. als Längeneinheit angenommen hat, für jeden Wärmegrad um $\frac{1}{5550}$ wächſt. Iſt daher b die bei t°C. beobachtete und b′ die auf 0° reducirte Barometerhöhe, ſo hat man $b' + \frac{b't}{5550} = b$ und hieraus

$b' = \frac{b}{1 + \frac{t}{5550}}$ oder annäherungsweiſe $b' = b - \frac{bt}{5550}$.

In dieſer Formel iſt t poſitiv oder negativ zu nehmen, je nachdem das Thermometer über oder unter dem Nullpunkte ſteht. Eine ähnliche Correction iſt auch in Beziehung auf die Temperatur der Scale anzubringen, welche jedoch immer viel geringer iſt.

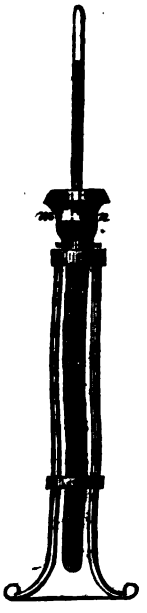
102. Wir haben ſchon im §. 99 bemerkt, daß ſich das Volumen der Gaſe durch Druck vermindern läßt. Man nehme nun eine heberförmige Barometerröhre, deren kürzerer Schenkel aber oben geſchloſſen iſt, während der längere offen bleibt, und fülle ſie mit etwas Queckſilber. Sobald dieſes in beiden Schenkeln gleich hoch ſteht, hat die in dem Raume ab eingeſchloſſene Luft genau den Druck einer Atmoſphäre auszuhalten. Gießt man jetzt wieder Queckſilber in den offenen Schenkel, ſo wird jedenfalls der Druck auf die abgeſperrte Luft vermehrt, indem ſie in einen kleineren Raum zuſammengepreßt wird. Das Queckſilber ſei nun im kürzeren Schenkel bis zum Punkte d geſtiegen, welcher genau die Mitte zwiſchen a und b einnimmt; dann iſt alſo die Luft auf die Hälfte ihres vorigen Volumens zuſammengepreßt. Mißt man nun vom Punkte c aus, welcher mit d in gleicher Höhe liegt, die Höhe ce der Queckſilberſäule im längeren Schenkel, ſo wird man finden, daß dieſelbe der Barometerhöhe vollkommen gleich iſt. Mithin hat die in bd eingeſchloſſene Luft einen Druck von zwei Atmoſphären auszuhalten. Iſt der offene Schenkel lang genug, ſo kann man auf dieſe Weiſe fortfahrend zeigen, daß ein Druck von 3, 4, 5, ... Atmoſphären die abgeſperrte Luft auf $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, .. ihres urſprünglichen Volumens zuſammenpreßt. Das Volumen der Gaſe verhält ſich alſo umgekehrt wie der Druck, dem ſie ausgeſetzt ſind. Dies iſt das Mariotte'ſche Geſetz. Arago und Dulong haben daſſelbe für atmoſphäriſche Luft mittelſt eines eigens hierzu hergeſtellten Apparates bis zu einem Drucke von 27 Atmoſphären beſtätigt.



Digitized by Google

Der folgende Apparat ist geeignet, das Mariotte'sche Gesetz für einen Druck, welcher weniger als eine Atmosphäre beträgt, zu bewahrheiten.

Eine etwas weite, unten verschlossene Glasröhre, welche oben in ein weiteres Gefäß endigt, wird in einem Gestelle vertical befestigt. Eine gerade cylindrische Barometerröhre fülle man, doch nicht ganz voll, mit Quecksilber und verschließe ihr offenes Ende mit dem Finger, wodurch eine Luftblase in den oberen Theil der Röhre steigt. Man tauche nun das untere Ende in das Quecksilber des Gefäßes und ziehe den Finger weg. Sogleich wird die Quecksilbersäule im Rohre bis zu einem bestimmten Punkte sinken, doch wird ihre Höhe nicht der Barometerhöhe gleich sein, weil ja in dem oberen Theile des Rohres sich Luft befindet und kein leerer Raum, wie beim Barometer. Drückt man die Röhre tiefer in das Quecksilber des weiten Rohres hinab, so muß natürlich das Volumen der eingeschlossenen Luft immer kleiner werden. Gewiß hat aber die abgesperrte Luft den Druck einer Atmosphäre auszuhalten, wenn man die Röhre so weit hinabdrückt, daß das Quecksilber innerhalb derselben genau im Niveau des äußeren Quecksilbers steht. Betrage nun die Höhe der abgesperrten Luftsäule a Centimeter. Wird die Röhre wieder in die Höhe gezogen, so muß offenbar auch das Volumen der eingeschlossenen Luft wieder zunehmen, während sich zugleich die Quecksilberkuppe in der Röhre über das äußere Niveau m n erhebt. Hat man die Röhre so weit gehoben, daß die Länge der abgesperrten Luftsäule 2 a Ctr. beträgt, so wird die Höhe der Quecksilbersäule über dem Niveau m n die Hälfte des gerade statthabenden Barometerstandes sein. Die Spannkraft der abgesperrten Luft und die Quecksilbersäule in der Röhre halten also zusammen dem atmosphärischen Drucke das Gleichgewicht. Die eingeschlossene Luft hat aber nur noch die Hälfte des atmosphärischen Druckes auszuhalten, während ihr Volumen doppelt so groß ist, als im vorigen Falle. Auf diese Weise kann man fortfahren; hebt man die Röhre so weit, daß die eingeschlossene Luft eine Länge von 3 a Ctr. in der Röhre einnimmt, wodurch ihr Volumen dreimal größer wird, so beträgt die Höhe der Quecksilbersäule $^2/_3$ des Barometerstandes und die abgesperrte Luftsäule hat nur noch $^1/_3$ des atmosphärischen Druckes auszuhalten.



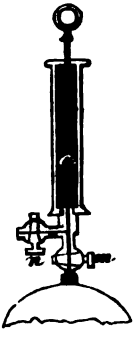
Digitized by Google

Genaue Resultate geben diese Versuche nur dann, wenn die Luft vollkommen trocken ist, was man einfach durch etwas Chlorcalcium, welches man auf die Quecksilberkuppe bringt, erreichen kann.

Näheres über das Mariotte'sche Gesetz, namentlich in Beziehung auf seine Abhängigkeit von der Temperatur, in der Wärmelehre.

103. Wir wollen nun ein Instrument betrachten, welches in der Physik eine große Rolle spielt und besonders geeignet ist, die Abhängigkeit der Spannkraft der Luft von ihrer Dichte zu zeigen.

Die Luftpumpe besteht in ihrer einfachsten Gestalt aus einem hohlen Cylinder, auf dessen Boden ein Kolben a fest aufsitzen kann. Von diesem Boden führt ein Kanal zu einem Ballon, welcher mit Luft angefüllt, aber von der äußeren Luft völlig abgeschlossen ist.

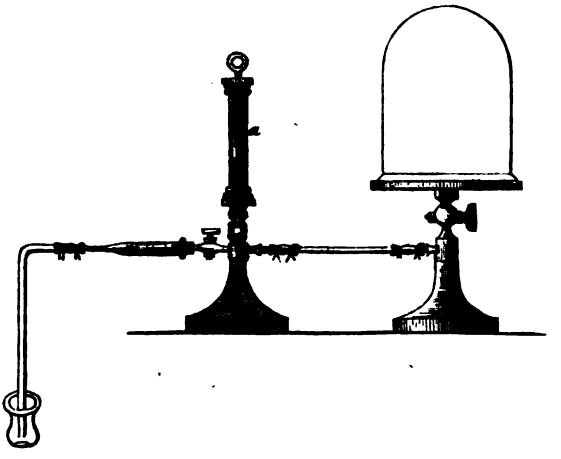


Wird nun der Kolben, welcher sich luftdicht an die Wände des Cylinders anschließt, in die Höhe gezogen, so muß sich unterhalb desselben ein luftleerer Raum erzeugen. Vermöge ihrer Elasticität wird die Luft im Ballon diesen Raum ausfüllen und eben dadurch im Ballon selbst verdünnt werden. Sobald der Kolben oben im Cylinder angekommen ist, schließt man den Hahn m, mittelst dessen man die Verbindung des Ballons mit dem Cylinder nach Willkür unterbrechen und wieder herstellen kann. Beim Niedergange des Kolbens wird die Luft im Cylinder comprimirt und nach außen entfernt, wenn man den Hahn n öffnet. Ist der Kolben unten angekommen, so schließt man n wieder und öffnet m. Hebt man jetzt den Kolben zum zweiten Male, so erfolgt eine neue Luftverdünnung im Ballon, welche durch öftere Wiederholung dieses Verfahrens bedeutend werden kann. Man sieht aber auch, daß das abwechselnde Schließen und Oeffnen der Hähne unbequem ist. Der Hahn m läßt sich leicht wegschaffen, wenn man im Kolben selbst ein Ventil anbringt, welches sich nach außen öffnet. Beim Aufziehen des Kolbens bleibt dieses Ventil vermöge des äußeren Luftdruckes geschlossen, öffnet sich aber beim Niedergange durch die comprimirte aus dem Ballon in den Cylinder getretene Luft, welche dadurch in den oberen Theil des Cylinders tritt und nach außen entweicht.

Gay-Lussac hat eine Handluftpumpe construirt, welche für gewöhnliche Versuche hinreichend und bequem ist. Die folgende Figur macht ihre Einrichtung leicht begreiflich: a ist der Cylinder

Digitized by Google

(Stiefel) der Luftpumpe mit dem Kolben, in welchem letzteren ein Ventil befindlich ist, das sich nach dem oberen Theile des Stiefels



öffnet. Am untersten Theile des Stiefels ragt ein horizontales Röhrenstück hervor, an welchem sich mittelst eines Kautschuckröhrchens ein Glasrohr ansetzt, das mit seinem anderen Ende auf dieselbe Weise an ein horizontales Röhrenstück befestigt ist. Dieses letztere führt durch einen verticalen Kanal zu dem Raume, welcher luftleer gemacht werden soll. Der Kanal kann durch einen Hahn nach Belieben geöffnet und wieder geschlossen werden. Ist dieser Hahn geöffnet, so wird beim Aufziehen des Kolbens ein Theil der Luft aus dem erwähnten Raume durch die Kanäle in den Stiefel treten und beim Niedergange des Kolbens durch dessen Ventil entweichen, insofern der Hahn wieder geschlossen ist. Man nennt den Raum, welcher luftleer gemacht werden soll, gewöhnlich den Recipienten. Insgemein besteht dieser, wie in unserer Figur, aus einer Glasglocke. Der untere Rand desselben ist vollkommen abgeschliffen und sitzt auf einem gleichfalls eben abgeschliffenen Teller, so daß zwischen beiden keine Luft durchdringen kann. Um den Verschluß noch vollkommener zu machen, beschmiert man den Rand der Glasglocke mit etwas Talg. In der Mitte des Tellers endigt der Kanal, welcher die Glocke mit dem Stiefel in Verbindung setzt.

Um den Grad der Luftverdünnung zu ermitteln, bedient man sich der sogenannten Barometerprobe. Sie besteht aus einer ungefähr 30 Zoll langen Glasröhre, welche mit ihrem unteren Ende in

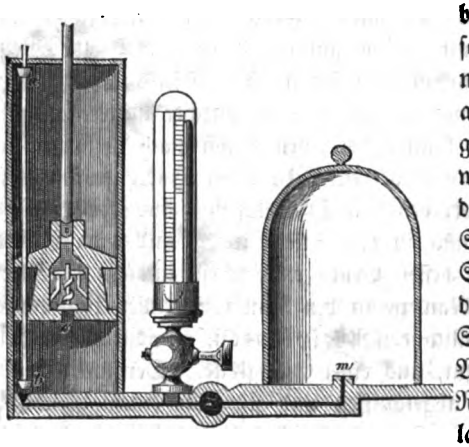
Digitized by Google

ein Gefäß voll Queckſilber taucht; ſie iſt oben umgebogen und mittelſt eines kurzen Röhrenſtückes an die Pumpe befeſtigt. Oeffnet man den Hahn a, ſo muß das Queckſilber in die Röhre ſteigen und zwar um ſo mehr, je bedeutender die Luftverdünnung iſt. Könnte man durch die Luftpumpe einen abſolut leeren Raum erzeugen, ſo müßte die Höhe der Queckſilberſäule in dieſer Röhre gleich der Barometerhöhe ſein.

Unter den größeren Luftpumpen iſt folgende eine der beſten.

A iſt der Cylinder mit ſeinem Kolben und einer Stange ab, c das Kolbenventil, welches beim Aufgang des Kolbens hermetiſch verſchloſſen bleibt, ſich aber leicht von unten nach oben öffnet, wenn der Kolben niedergeht. Sitzt der Kolben feſt auf dem Boden des Stiefels, ſo verſchließt der abgeſtumpfte Kegel b am Ende der Stange die unter ihm befindliche koniſche Oeffnung, ſo daß die obere Fläche des Kegels mit dem Boden des Stiefels in einerlei Ebene liegt. Von der eben erwähnten Oeffnung führt ein Kanal bis m, wo ſich eine Schraube befindet, an welcher man Ballons oder überhaupt den Recipienten befeſtigt.

In dem Kanale, welcher den Recipienten mit dem Stiefel verbindet, befindet ſich ein ſogenannter Wechſelhahn, nämlich ein ſolcher, welcher außer einer gerade durchgehenden Oeffnung, die während des Auspumpens den Recipienten mit dem Stiefel verbindet, noch eine Seitenöffnung hat, welche durch einen metallenen Stöpſel verſchloſſen iſt. Will man in den leeren Recipienten wieder Luft einlaſſen, ſo dreht man den Hahn ſo, daß dieſe Seitenöffnung dem Recipienten zugekehrt iſt und zieht den Stöpſel heraus. Man bemerkt leicht, daß hier die Luftverdünnung auf dem nämlichen Princip beruht, wie bei der vorigen Pumpe. Wird der Kolben, wenn er feſt auf dem Boden des Stiefels ſitzt, gehoben, ſo entſteht unter ihm ein luftleerer Raum, in welchen ein Theil der Luft aus der Glocke ſtrömt, da mit dem Kolben auch die Stange ab gehoben wird, welche die zum Kanal führende



Digitized by Google

conische Oeffnung schließt. Die Stange stößt aber während der Hebung des Kolbens bald mit dem Absatz a an die obere Platte des Cylinders, worauf sich der Kolben längs der Stange mit einiger Reibung fortbewegt. Beim Niedergange des Kolbens wird die conische Oeffnung wieder geschlossen, so daß die Luft auf keinen Fall weiter in die Glocke zurückströmen kann. Die abgeschlossene Luft muß also durch das Ventil c vollständig entweichen, bis der Kolben auf dem Boden des Stiefels ankommt. Beim zweiten Aufziehen des Kolbens findet eine neue Luftverdünnung statt, u. s. f.

Bei dieser Art von Luftpumpen besteht die Barometerprobe gewöhnlich aus einem kurzen, heberförmigen Barometerrohre, welches in einer langen, engen Glasröhre, wie die Figur zeigt, eingeschlossen ist. Diese Glasglocke kann durch einen Hahn mit dem Kanale der Luftpumpe in Verbindung gesetzt werden. Das Quecksilber der Röhre füllt den geschlossenen Schenkel ganz aus und beginnt erst zu sinken, wenn der Druck der Luft innerhalb des Recipienten auf einen bestimmten Theil des atmosphärischen Druckes herabgebracht ist. Der Grad der Luftverdünnung wird dann durch die Differenz im Stande der beiden Quecksilberkuppen angezeigt.

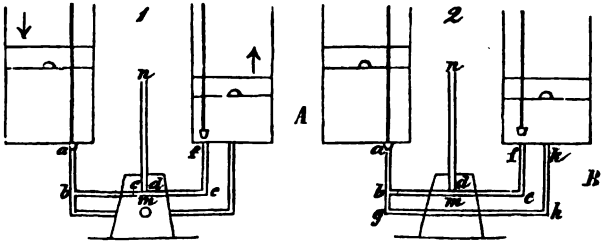
Hat man die Luftverdünnung möglichst weit getrieben, so ruht auf der Außenfläche des Kolbens beinahe der volle Druck einer Atmosphäre, welcher also noch außer der Reibung überwunden werden muß, um den Kolben zu heben. Hat man aber eine Luftpumpe mit zwei Stiefeln, so sieht man leicht, daß der Druck auf den einen Kolben sich gegen den Druck auf den anderen größtentheils hebt; es bleibt also nur noch die Reibung als Bewegungshinderniß. Bei einer zweistiefeligen Luftpumpe sind die beiden Kolbenstangen gezahnt und greifen in dasselbe Getriebe ein, so daß die eine steigt, wenn die andere niedergeht. Am Getriebe befindet sich eine Kurbel, welche in alternirender Richtung gedreht wird. Die Verdünnung geht dabei ohne Unterbrechung fort, so daß die Hälfte der Zeit erspart wird.

Es versteht sich von selbst, daß alle Theile der Luftpumpe vollkommen ausgearbeitet sein müssen. Aber mit welcher Sorgfalt dies auch geschehen sein mag, so wird doch immer noch ein kleiner Raum zwischen der unteren Kolbenfläche und dem Boden des Stiefels vorhanden sein, wenn der Kolben auf dem Boden sitzt. Selbst unter der Voraussetzung, daß der Kolben vollkommen genau auf den Boden paßt, wird immer noch ein Raum unmittelbar unter dem Kolbenventil bleiben. Diese beiden Räume bilden den sogenannten *schädlichen* Raum der Luftpumpe, in welchem immer noch etwas Luft von der

Digitized by Google

Dichtigkeit der Atmosphäre zurückbleibt, wenn beim Niedergange des Kolbens das Kolbenventil sich hebt, um die comprimirte Luft entweichen zu lassen. Wird der Kolben wieder in die Höhe gezogen, während der Recipient noch abgeschlossen ist, so muß sich die im schädlichen Raume befindliche Luft im ganzen Stiefelraume verbreiten; ihre Dichtigkeit wird sich also nun zur Dichtigkeit der atmosphärischen Luft verhalten, wie das Volumen des schädlichen Raumes zum Volumen des ganzen Stiefels. Hat die Luft des Recipienten diesen Grad der Verdünnung schon erlangt, so kann, wie leicht einzusehen, aus ihm keine Luft mehr in den Stiefel übergehen, das Kolbenventil wird sich nicht mehr heben und die Grenze der Luftverdünnung ist erreicht.

Doch hat Babinet einen Hahn erfunden, vermittelst dessen die Luftverdünnung noch weit über die angegebene Grenze fortgesetzt werden kann. Dieser Hahn befindet sich da, wo die von den Stiefeln kommenden Kanäle in den zum Recipienten führenden Kanal einmünden. Bei der gewöhnlichen Anordnung der zweistiefeligen Luftpumpe



stehen die beiden Stiefel mit dem Recipienten durch die Kanäle abc, def und mn in Verbindung. Die beiden Stiefel nehmen abwechselnd Luft aus dem Recipienten auf und der Babinet'sche Hahn hat dabei eine solche Stellung, als ob er gar nicht vorhanden wäre. Sobald aber die obige Grenze der Luftverdünnung erreicht ist, gibt man dem Hahne die Stellung 2. Der Weg ab vom Stiefel A zum Recipienten ist dann abgesperrt, während der Stiefel B noch mit dem Recipienten durch den Kanal def in Verbindung steht; außerdem ist aber durch den Kanal abghk eine Verbindung zwischen beiden Stiefeln hergestellt. Sitzt nun der Kolben im Stiefel A auf dem Boden, so befindet sich in dem schädlichen Raume dieses Kolbens nach dem Obigen noch etwas Luft von der Dichtigkeit der Atmosphäre. Beim Aufziehen des Kolbens kommt A mit B in Verbindung, während B durch den Verschluß des Bodenventils f vom Recipienten abgeschlossen wird. Durch den Aufgang des Kolbens in A verbreitet sich nun

Digitized by Google

nicht allein die Luft im schädlichen Raume dieses Kolbens in den Stiefelraum A, sondern es wird auch noch die sämmtliche Luft in B während des gleichzeitigen Niederganges des Kolbens in B nach A getrieben. Geht jetzt der Kolben in A wieder abwärts, so schließt sich das Bodenventil a, während sich das Kolbenventil öffnet, durch welches die aufgenommene Luft entweichen muß. Die in dem schädlichen Raume von B noch zurückgebliebene Luft ist jetzt bei weitem dünner als die atmosphärische und kann auf dieselbe Weise noch weiter verdünnt werden, bis man eine neue Grenze der Luftverdünnung erreicht, welche aber über die anfängliche weit hinausgeht.

Dieselben Dienste leistet ein von Graßmann erdachter Hahn, welcher aber gleich von Anfang an in Thätigkeit ist, indem beide Stiefel abwechselnd zur Verdünnung beitragen, ohne daß es, wie beim Babinet'schen Hahne, nöthig ist, die Luft aus dem Recipienten in den einen Stiefel und dann aus diesem in den anderen zu bringen. —

Um die Luft in einem Raume zu verdichten, kann man sich einer besonderen Compressionspumpe bedienen, welche sich von der Luftpumpe dadurch unterscheidet, daß sich die Ventile nach entgegengesetzter Richtung schließen und öffnen. Geht der Kolben nieder, so comprimirt er die Luft und treibt sie in den Recipienten, wird er dagegen aufgezogen, so öffnet die äußere Luft das Kolbenventil nach innen und dringt in den Stiefel, während die comprimirte Luft im Recipienten das Bodenventil des Stiefels geschlossen hält. Der Recipient ist auf den Teller geschraubt.

Nebenstehende Figur zeigt eine Compressionspumpe, welche an die Apparate geschraubt werden kann, in denen die Luft zu verdichten ist. A ist ein hohler Cylinder, in welchem sich wie bei der Luftpumpe ein Kolben luftdicht bewegen kann. An dem unteren Ende des Cylinders befindet sich ein Ventil, welches sich von innen nach außen öffnet. Auch wird hier der Apparat angeschraubt, in welchem die Luft verdichtet werden soll. Bei B ist eine Oeffnung oder statt dessen ein Ventil, welches sich von außen nach innen öffnet und die äußere Luft frei ein, aber nicht wieder hinauslässt. Hebt man nun den Kolben über die Oeffnung oder über das Ventil B und drückt ihn dann hinab, so wird die Luft durch Wiederholung dieses Verfahrens in dem angeschraubten Gefäße verdichtet. Man bemerkt, daß man dieses Instrument auch gebrauchen kann, um irgend ein Gas zu comprimiren, wenn man nur den Gasbehälter mit dem Seiten-

Digitized by Google

ventil in Verbindung ſetzt, was bequem mittelſt einer Schraube geſchehen kann.

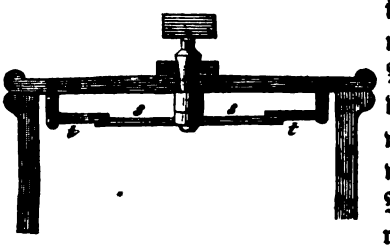
Mittelſt dieſer Compreſſionspumpe kann man eine Windbüchſe laden, indem man die Luft in einem ſtarken metallenen Gefäße, welches ſich im Kolben befindet, verdichtet. Der Kolben wird durch ein Ventil, welches ſich von außen nach innen öffnet, geſchloſſen. Schraubt man nun das Rohr an und öffnet mittelſt des Drückers das Ventil, ſo entweicht ein Theil der eingeſchloſſenen Luft und treibt, wie in einem Feuergewehre, die Kugel mit großer Gewalt fort. Weil ſich das Ventil augenblicklich wieder ſchließt, ſo kann man mehrere Schüſſe hinter einander thun, ohne von Neuem laden zu müſſen, und zwar um ſo mehr, je größer das Gefäß im Kolben iſt. —

Die Verſuche, welche ſich mittelſt der Luft anſtellen laſſen, ſind außerordentlich zahlreich, kommen jedoch faſt alle darin überein, daß ſie die Spannkraft und den hiermit verbundenen Druck der atmoſphäriſchen Luft in's Licht ſtellen. So ſchwillt eine mit wenig Luft angefüllte, ſchlaffe Thierblaſe an, wenn man ſie unter den Recipienten der Pumpe bringt und die Luft verdünnt. Läßt man die Luft wieder in den Recipienten treten, ſo ſchrumpft die Blaſe in Folge des Luftdruckes wieder zuſammen. Bringt man ſtatt der Blaſe ein dünnes, mit einem Kork geſchloſſenes Glas unter den Recipienten, ſo wird entweder der Kork in die Höhe geſchleudert oder das Glas zerſprengt. Sobald die Luft unter dem Recipienten hinreichend verdünnt iſt, wird er von dem äußeren Luftdruck feſt auf den Teller gepreßt. Aus demſelben Grunde können auch die Magdeburger Halbkugeln nur von einer bedeutenden Gewalt getrennt werden, wenn in ihnen die Luft verdünnt iſt. Auch läßt ſich mittelſt der Luftpumpe leicht durch einen Verſuch direct nachweiſen, daß die Luft ſchwer iſt. Zu dieſem Zwecke mache man einen Ballon, welcher mit einem Hahne verſehen iſt, luftleer und hänge ihn dann an dem einen Arme eines Wagebalkens auf. Auf die andere Seite legt man Gewichte, bis Gleichgewicht ſtattfindet. Oeffnet man jetzt den Hahn, ſo füllt ſich der Ballon wieder mit Luft, das Gleichgewicht wird zerſtört, und die Wage neigt ſich nach der Seite des Ballons hin. Um alſo das Gleichgewicht wieder herzuſtellen, muß man auf die andere Seite noch einige Gewichte auflegen, welche gerade ſo viel betragen, als die Luft im Ballon wiegt. Mithin erfährt man aus der Gewichtsdifferenz das Gewicht der Luft unter dem Volumen des Ballons.

Auch können wir jetzt durch einen Verſuch mit der Luftpumpe einen Satz beſtätigen, welchen wir ſchon im §. 63 entwickelt haben,

Digitized by Google

nämlich, daß im luftleeren Raume alle Körper gleich schnell fallen. Man bedient sich hierzu eines Glascylinders, dessen oberer und unterer Rand möglichst eben abgeschliffen ist. Diesen Cylinder setzt man auf den Teller der Luftpumpe. Die obere Oeffnung des Cylinders ist mit einer Metallplatte hermetisch verschlossen. Durch die Mitte der Platte geht ein luftdicht schließender Metallconus, welcher nach Belieben gedreht werden kann. Zugleich mit dem Metallconus drehen sich zwei horizontale Stäbchen s. Auf diesen Stäbchen ruhen die Metallplättchen t, von denen jedes um einen horizontalen Stift leicht drehbar ist. Dreht man nun die beiden Stäbchen mittelst des Metallconus so weit aus ihrer Lage, daß sie den Plättchen nicht mehr zur Stütze dienen, so klappen diese um und die Körper, welche man auf dieselben gelegt hatte, fallen herab. Es ist jedoch der Anschaulichkeit halber zweckmäßig, wenn die Stäbchen nicht gleichzeitig umklappen. Legt man dann auf jedes Stäbchen zwei ungleichartige Körper, etwa ein Metallstück und eine Flaumfeder, und läßt das eine Stäbchen umklappen, bevor man die Luft ausgepumpt hat, so fällt das Metallstück weit schneller als die Flaumfeder. Pumpt man aber die Luft aus dem Recipienten und läßt das zweite Stäbchen umklappen, so fallen beide Körper, die Feder und das Metall, gleich schnell.



104. Vermöge der Repulsion zwischen allen einzelnen Theilchen muß sich ein Gas nach allen Richtungen im Raume zerstreuen, falls dies nicht äußere Umstände verhindern. Durch Einfluß der Schwere erhält jedes Theilchen einen Antrieb zum Sinken, was der Ausdehnung des Gases nach oben entgegenwirkt. Eine Schicht im Innern des Gases hat von der über ihr liegenden Gassäule einen Druck auszuhalten, welcher sich nach allen Seiten gleichmäßig fortpflanzt, aber von oben nach unten zunimmt. Je tiefer die Schicht unter der Oberfläche der Gasmasse liegt, desto größer ist der auf sie wirkende Druck. So muß der Druck und damit auch die Dichte der Luft bei gleicher Temperatur von unten nach oben abnehmen, und in der That, erhebt man sich mit einem Barometer vom Fuße auf den Gipfel eines hohen Berges, so erfährt man, daß die Quecksilbersäule bedeutend fällt. Ueberhaupt findet aber für eine Gasmasse, mag sie nun in einem Gefäße eingeschlossen sein oder sich frei im Raume befinden, Gleich-

Digitized by Google

gewicht statt, wenn die Elasticität in einer und derselben horizontalen Schicht überall dieselbe ist. Auch ist das Gleichgewicht nur dann dauernd, wenn die tiefsten Schichten am dichtesten sind.

Verhielte sich die Luft wie eine tropfbare Flüssigkeit, z. B. wie Wasser, so würde ihr Druck von unten nach oben gleichförmig abnehmen, aber wegen ihrer Elasticität geschieht dies auf andere Weise. Man denke sich die verticale Luftsäule ax durch die in der Figur angedeuteten Horizontalebenen in gleiche Schichten von so geringer Höhe h getheilt, daß man die Dichtigkeit in jeder einzelnen Luftschicht für gleichförmig annehmen kann. Seien die Gewichte der einzelnen Luftschichten, von der untersten an gerechnet, p_1, p_2, p_3, ... ihre Dichten d_1, d_2, d_3, ... dagegen die Gewichte der Luftsäulen, welche auf den einzelnen Schichten ruhen, P_0, P_1, P_2, P_3, ... so daß P_0 das Gewicht der ganzen verticalen Luftsäule ist, welche auf der Basis a ruht, P_1 das Gewicht der Säule auf b, u. s. f.

Nun verhalten sich bei gleichem Volumen die Dichtigkeiten der einzelnen Luftschichten wie ihre Gewichte und nach dem Mariotte'schen Gesetze wie die Kräfte, wodurch sie (die Schichten) zusammengedrückt werden. Diese Kräfte sind aber nichts Anderes als die Gewichte jener Luftsäulen; folglich verhalten sich auch die letzteren wie die Gewichte der entsprechenden Schichten, auf denen sie ruhen. Demnach

$$p_1 : P_1 = p_2 : P_2 = p_3 : P_3 = \ldots . p_n : P_n \text{ oder}$$
$$p_1 + P_1 : P_1 = p_2 + P_2 : P_2 = p_3 + P_3 : P_3 = \ldots p_n + P_n : P_n.$$

Nun ist aber $p_1 + P_1 = P_0$, d. h. das Gewicht der Schicht ab nebst dem Drucke der Luft auf b ist gleich dem Drucke der ganzen Luftsäule auf die Basis a; eben so ist $p_2 + P_2 = P_1$, ... $p_n + P_n = P_{n-1}$.

Dies berücksichtigt hat man

$$P_0 : P_1 = P_1 : P_2 = P_2 : P_3 = \ldots P_{n-1} : P_n.$$

Man sieht, daß die Gewichte oder auch die Dichtigkeiten der Luftsäulen nach oben in einer geometrischen Reihe abnehmen, wenn die Entfernungen von der Basis a eine arithmetische Reihe, 0, h, 2 h, 3 h, ... bilden.

Aus obiger Verhältnißreihe erhält man allgemein $P_0 : P_1 = P_{n-1} : P_n$ oder $P_n = \frac{P_1}{P_0} . P_{n-1}$. Setzt man Kürze halber $\frac{P_1}{P_0} = Q$ und für n allmälig 1, 2, 3, ..., so erhält man für die auf einander folgenden Druckkräfte der Luft $P_1 = Q . P_0$, $P_2 = Q . P_1 = Q^2 . P_0$, ...

Digitized by Google

$P_n = Q^n . P_0$. Für zwei verschiedene Luftschichten hat man allgemein $P_m = Q^m . P_0$ und $P_n = Q^n . P_0$ und hieraus $\frac{P_m}{P_n} = Q^{m-n}$. Geht man zu den Logarithmen über, so folgt $(m - n) \lg Q = \lg P_m - \lg P_n$. Da nun h die Höhe einer einzelnen Luftschicht ist, so hat man $mh - nh = H$ für den Höhenunterschied beider Luftschichten und folglich

$$H = \frac{h}{\lg Q} (\lg P_m - \lg P_n),$$

wenn man auch auf der anderen Seite der Gleichung mit h multiplicirt.

Die Druckkräfte P_m und P_n sind aber auch den an den entsprechenden Orten stattfindenden Barometerständen B und b proportional, deshalb auch

$$H = \frac{h}{\lg Q} (\lg B - \lg b).$$

Uebrigens setzt diese Formel voraus, daß die Temperatur und Intensität der Schwere in der ganzen Luftsäule dieselbe sei, und zwar bezieht sie sich auf die Temperatur 0. Für irgend eine andere Temperatur t muß man den Höhenunterschied noch mit $1 + \alpha t$ multipliciren, wo α der Ausdehnungscoefficient der Luft für eine Temperaturveränderung von 1° C. ist. Dieser Coefficient ist ungefähr 0,00365, wie wir in der Wärmelehre sehen werden. In der Wirklichkeit nimmt die Temperatur der Luft von unten nach oben ab, aber nicht gleichförmig; doch kann man annehmen, daß die Temperatur nach oben in einer arithmetischen Reihe fällt, wenn die Höhen in einer solchen Reihe zunehmen. Deshalb setzt man für t das arithmetische Mittel aus den Temperaturen am oberen und unteren Beobachtungsorte. Um ein scharfes Resultat zu erhalten, hat man auch noch eine Correction in Beziehung auf die in der Luft enthaltenen Wasserdünste anzubringen.

Uebrigens müssen die Barometerbeobachtungen an den Orten, deren Höhenunterschied man berechnen will, gleichzeitig angestellt werden, da das Barometer schon an einem und demselben Orte fortwährend schwankt. Am sichersten verfährt man, wenn man für jeden Ort den mittleren Barometerstand nimmt.

105. Wie jeder Körper, so ist auch der thierische Organismus dem atmosphärischen Luftdrucke ausgesetzt. Nehmen wir die Oberfläche eines erwachsenen Menschen zu 15 Odrtf. an, so ergiebt sich ein Totaldruck zu 32400 Pfd., da der atmosphärische Druck auf 1 Quadratzoll 15 Pfd. beträgt. Doch wirkt dieser Druck nicht ein-

Digitized by Google

seitig, etwa nur von oben herab, auf den menschlichen Körper, sondern von allen Seiten gleichförmig gegen denselben, wie es die Eigenschaft der Luft mit sich bringt; auch wirkt er von innen heraus, weil die Luft innerhalb des Körpers mit der äußeren gleiche Dichtigkeit hat. Wie groß auch der Gesammtdruck der atmosphärischen Luft auf den Körper scheinen mag, so kommt doch nur ein sehr kleiner Antheil desselben auf jedes einzelne Theilchen des Körpers.

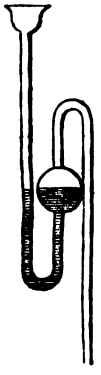
Dagegen spielt der Luftdruck eine wichtige Rolle in der Mechanik des menschlichen Körpers. So wird z. B. das Gewicht des Beines, wenn man es so viel krümmt, daß es hängt, ohne den Boden zu berühren, von dem Drucke, welchen die atmosphärische Luft von unten nach oben ausübt, getragen, so daß keine Kraft nöthig ist, um während des Gehens das nicht auf dem Boden stehende Bein zu tragen. Der Schenkelknopf des Beines paßt nämlich luftdicht in eine glatte, schlüpfrige Vertiefung des Beckens, die sogenannte Pfanne. In dieser wird das schwebende Bein zurückgehalten, wenn der Luftdruck von unten nach oben gegen dasselbe wirkt. Das schwebende Bein fällt nicht herab, wenn man an einer Leiche sämmtliche Muskeln durchschneidet, welche das Bein mit dem Becken verbinden, zum Zeichen, daß es diese Muskeln nicht sind, welche das schwebende Bein während des Lebens tragen; eben so wenig fällt es herab, wenn man die Kapselmembran wegnimmt, welche das Gelenk einhüllt. Bohrt man aber mitten durch das Becken in die Pfanne ein kleines Loch, durch welches Luft eindringen kann, so fällt das Bein in dem Augenblicke herab, wo der Bohrer die Pfanne eben durchbrochen hat. Schiebt man den Schenkelknopf wieder fest in die Pfanne und hält das Loch im Becken mit dem Finger zu, so wird auch das Bein wieder vom Luftdrucke getragen. In ähnlicher Weise werden auch die Arme vom Luftdrucke getragen. — Man sehe hierüber die Untersuchungen der Gebrüder Weber in ihrer Mechanik des menschlichen Körpers.

Aus dem Vorstehenden erklärt sich die auffallende Müdigkeit, welche man während des Gehens auf hohen Bergen empfindet. Ersteigt man einen hohen Berg, so wird freilich wegen der Dünne der Luft auch das Athmen beschwerlich, der Puls schlägt schneller, und von Zeit zu Zeit entweichen Luftbläschen aus den Ohren, u. s. w.

106. Um die elastische Kraft irgend eines Gases zu messen, welches in einem Gefäße enthalten ist, bedient man sich des sogenannten Manometers, das mit der Barometerprobe der Luftpumpe

Digitized by Google

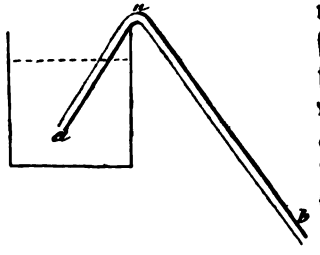
übereinkommt. Auch gebraucht man hierzu nach Welter sogenannte Sicherheitsröhren, die auf demselben Principe wie die Manometer beruhen. Bringt man die nebenstehende Sicherheitsröhre mit ihrem



unteren Ende in den Raum, welcher irgend ein Gas enthält, so ist die Elasticität des Gases dem atmosphärischen Drucke gleich, wenn die Flüssigkeit der Röhre in beiden Schenkeln gleich hoch steht. Außerdem läßt sich aus der Differenz der Flüssigkeitssäulen in beiden Schenkeln immer die Spannkraft des Gases bestimmen, sofern man das specif. Gewicht der Flüssigkeit in der Röhre kennt. — Zu demselben Zwecke bringt man Druckventile an die Apparate an, worin sich das Gas befindet. Das Ventil hat den Druck des Gases im verticalen Sinne auszuhalten; kennt man nun das Gewicht, durch welches das Ventil belastet ist, wie auch die Flächengröße des Ventils, so läßt sich hieraus leicht die Spannkraft des Gases für den Augenblick berechnen, wo es im Stande ist, das Ventil zu heben. Es betrage die Belastung des Ventils a Pfd., der Flächeninhalt desselben b Quadratzoll; dann hat jeder Quadratzoll dieser Fläche ein Gewicht von $\frac{b}{a}$ Pfd. zu tragen. Der Druck der Atmosphäre auf jeden Quadratzoll beträgt aber 15 Pfd., also die Spannkraft des Gases, welche das Ventil zu heben vermag, gleich $\frac{b}{15\,a}$ Atmosphären. Hierzu kommt noch eine Atmosphäre wegen des gewöhnlichen Luftdruckes.

107. Durch den Druck der Atmosphäre in Verbindung mit den Gesetzen des Gleichgewichts schwerer Flüssigkeiten läßt sich die Wirkung vieler Apparate erklären, von denen wir einige näher in Betracht ziehen wollen.

Der Heber ist eine gekrümmte Röhre von ungleich langen Schenkeln. Man tauche den kürzeren Schenkel in eine Flüssigkeit

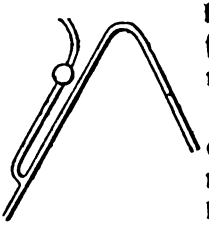


und denke sich die ganze Röhre mit derselben gefüllt. Nun haben beide Flüssigkeitssäulen, sowohl ah als auch bh, vermöge der Schwere ein Bestreben herabzufallen. Der Schwere wirkt aber der Luftdruck entgegen, und zwar einerseits gegen b, andererseits auf den Spiegel der Flüssigkeit im Gefäße. Der Luft-

Digitized by Google

druck ist beiderseits gleich, und man erkennt, daß Gleichgewicht vorhanden sein würde, wenn die Flüssigkeitssäulen in beiden Schenkeln gleich tief ständen. Weil aber b tiefer als a liegt, so kann das Gleichgewicht nicht bestehen, sondern die Flüssigkeit muß bei b auslaufen; denn die Säule im Schenkel bb hat das Uebergewicht. Wenn man also bei b die Luft in der Röhre ausſaugt, so entsteht ein leerer Raum, in Folge dessen sich die Flüssigkeit erhebt, bis sie den höchsten Punkt h erreicht hat; hierauf senkt sie sich im längeren Schenkel und fließt bei b aus. Durch den Luftdruck auf den Spiegel der Flüssigkeit wird immer wieder Flüssigkeit in die Röhre getrieben, in dem Maße, als sie bei b ausströmt. Sobald aber die Flüssigkeit unter den Punkt a gefallen ist, hat das Ausfließen ein Ende.

Damit die Flüssigkeit beim Ausſaugen der Luft nicht in den Mund kommt, und auch der Bequemlichkeit wegen, befindet sich an manchen Hebern noch eine besondere Saugröhre, wie die nebenstehende Figur zeigt.



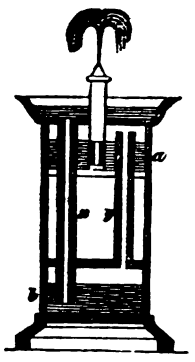
Um kleine Quantitäten einer Flüssigkeit aus einem Gefäße zu heben, gebraucht man den sogenannten Stechheber, welcher eine gerade an beiden Enden offene Röhre ist. Der untere Theil, welcher in die Flüssigkeit getaucht wird, hat eine enge Mündung. Wird dieser Heber in eine Flüssigkeit gebracht, so steigt selbe sogleich in ihm auf, besonders wenn man oben mit dem Munde die Luft ausſaugt. Verschließt man alsdann die obere Oeffnung mit dem Daumen, so kann man ihn mit der Flüssigkeit gefüllt herausnehmen. —

Der Heronsball besteht aus einem Gefäße, durch dessen Hals lufttricht eine mit einer feinen Oeffnung versehene Röhre beinahe bis auf den Boden geht. Wird nun die Luft im oberen Theile des Gefäßes auf irgend eine Weise verdichtet, so muß ihr Druck auf die Oberfläche des Wassers dasselbe aus der feinen Oeffnung in Gestalt eines Strahles hervortreiben. Das Wasser kann eine bedeutende Höhe erreichen, wenn man die Luft mittelst einer Compressionspumpe auf mehrere Atmosphären verdichtet. In diesem Falle läßt sich die Ausflußspitze ab- und wieder anschrauben, um das Gefäß durch Hilfe eines Hahnes mit der Pumpe in Verbindung bringen zu können.

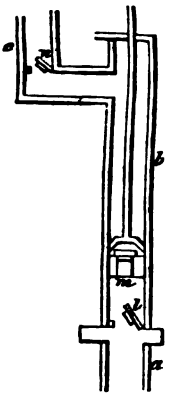
Die folgende Figur stellt einen Heronsbrunnen dar.

Digitized by Google

Von dem oberen offenen Gefäße geht eine Röhre x durch das Gefäß a bis beinahe auf den Boden des unteren Gefäßes b. Gießt man in das erwähnte tellerförmige Gefäß Waſſer, ſo fließt dieſes durch die Röhre x zum Gefäße b und treibt die darin befindliche Luft durch die Röhre y in das Gefäß a, welches gleichfalls Waſſer enthält. Hierdurch wird aber die Luft im Gefäße a comprimirt und ihr Druck auf die Oberfläche des Waſſers treibt daſſelbe, wie im Heronsballe, in der Geſtalt eines Strahles in die Höhe. —



Die Saugpumpe beſteht aus einem höchſtens 30 Fuß langen Saugrohre a, welches mit ſeinem unteren Ende in's Waſſer zu ſtehen kommt, einem Stiefel b mit Kolben, einem Steigrohre c, und drei Ventilen l, m und n, von denen ſich das erſte am Boden des Stiefels, das zweite im Kolben und das dritte am Anfange der Steigröhre befindet. Ueberdies öffnen ſich ſämmtliche Ventile von unten nach oben. Wird nun der Kolben gehoben, ſo entſteht unter ihm ein luftverdünnter Raum, in welchen die Luft der Saugröhre dringt, indem ſie das Ventil l hebt. Oberhalb des Kolbens wird aber gleichzeitig die Luft verdichtet, in Folge deſſen ſich das Ventil m ſchließt, während ſich n öffnet, um die comprimirte Luft entweichen zu laſſen. Durch die Verdünnung der Luft in der Saugröhre muß in dieſer das Waſſer wegen des überwiegenden äußeren Luftdruckes ſteigen. Geht der Kolben nieder, ſo ſchließt ſich l, während ſich das Ventil m öffnet, durch welches ſich die verdichtete Luft unterhalb des Kolbens in den oberen Theil des Stiefels verbreitet. Nach einer gewiſſen Anzahl von Kolbenzügen ſteigt das Waſſer durch das Ventil l in den unteren Stiefelraum und gelangt von hier beim Niedergange des Kolbens durch das Ventil m in den oberen Theil und beim Aufziehen des Kolbens endlich durch das Ventil n in die Steigröhre. Ließe ſich unterhalb des Kolbens ein abſolut luftleerer Raum hervorbringen, ſo könnte ſich das Waſſer 32′ hoch über den äußeren Waſſerſpiegel erheben und das Ventil l könnte eben ſo hoch liegen. Aber der ſchädliche Raum läßt ſich hier ſo wenig als bei der Luftpumpe vermeiden, weshalb das

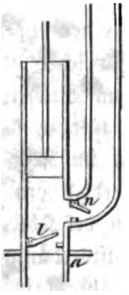


Digitized by Google

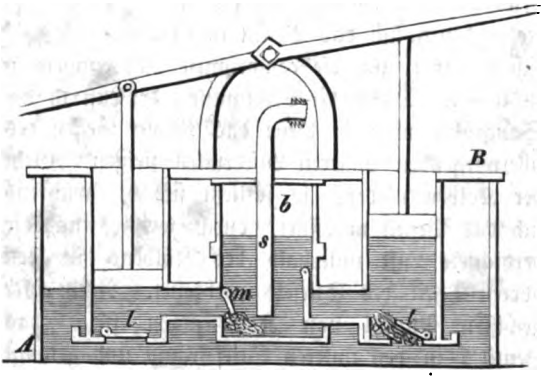
Ventil l bei weitem nicht ſo hoch über dem äußeren Niveau liegen darf.

Beim Heben des Kolbens iſt nicht allein die Reibung zu überwinden, ſondern auch noch der Druck einer Waſſerſäule, deren Baſis die Oberfläche des Kolbens und deren Höhe die verticale Entfernung der Ausflußöffnung im Steigrohre vom Spiegel des Waſſerbehälters iſt.

Die Druckpumpe beſteht ebenfalls aus einer Saugröhre a, einem Stiefel mit Kolben und einer Steigröhre, hat aber nur zwei Ventile l und n. Das Waſſer gelangt hier wie bei der vorigen Pumpe aus der Saugröhre in den Stiefel; aus dieſem wird es beim Hinabgehen des Kolbens in die Steigröhre gepreßt, wo es immer höher zu ſtehen kommt, da das Ventil n ſein Zurückfließen verhindert. —



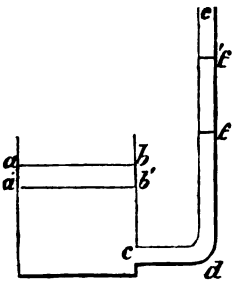
Die Feuerſpritze beſteht aus einem mit Waſſer gefüllten Kaſten AB, in welchem ſich zwei Pumpenſtiefel mit den zugehörigen Kolben befinden, und einem Windkeſſel b. Wird der Kolben gehoben, ſo bringt das Waſſer durch das Ventil l in den Stiefel; beim Niedergange des Kolbens ſchließt ſich das Ventil l, während ſich das Ventil m öffnet, durch welches das Waſſer in den Windkeſſel b gepreßt wird. Je mehr Waſſer in dieſen gelangt, deſto ſtärker wird auch die Luft in dem oberen Theile deſſelben comprimirt. Der Druck dieſer comprimirten Luft treibt das Waſſer in das Rohr s, aus dem es mit großer Gewalt hervorſpringt. Auf das Rohr s, welches, wie man ſieht, beinahe auf den Boden des Windkeſſels reicht, wird eine Röhre mit enger Oeffnung, der ſogenannte Schwanenhals, geſchraubt. —



Die hydrauliſche Preſſe beſteht im Weſentlichen aus einem

Digitized by Google

verticalen cylindrischen oder prismatischen Gefäße, das bis ab mit



Wasser gefüllt und mit einem Deckel verschlossen ist, der jedoch längs der Wände gleiten kann. Bei c öffnet sich das Gefäß in eine gebogene Röhre, deren längerer Schenkel vertical stehen mag, was übrigens nicht nothwendig ist. Durch den Druck des Deckels erhebe sich das Wasser im Schenkel de zu einem Punkte f, der über dem horizontalen Schnitte ab liegt. Wird jetzt das Gleichgewicht des Deckels durch ein neues Gewicht X vermehrt, so muß die Flüssigkeit im Gefäße sinken, etwa bis a'b', und im Schenkel de etwa bis zu f' steigen. Bezeichnet man durch β den Flächeninhalt des horizontalen Querschnittes vom Gefäße, so ist der auf die Einheit der Oberfläche, etwa auf ein Quadratcentimeter, bezogene Druck in a'b' um $\frac{X}{\beta}$ größer als in ab. Zu gleicher Zeit muß auch der auf dieselbe Einheit der Oberfläche bezogene Druck, welcher vom Gewichte des Wassers im Schenkel de herrührt, um sgx zunehmen, sofern s das specif. Gewicht des Wassers und x die Höhe des Punktes f' über dem Punkte f bezeichnet. Man hat also für das Gleichgewicht $X = sg\beta x$. Aus dieser Gleichung läßt sich leicht das Gewicht X berechnen, wenn man x durch Beobachtung kennt. Ist β sehr groß im Vergleiche mit dem Querschnitte der Röhre, so entsprechen sehr großen Lasten des beweglichen Deckels geringe Höhen des Wassers in der Röhre de. Was wir so eben vom Sinken des Deckels mit seiner Last und dem Steigen des Wassers in der Röhre de entwickelt haben, gilt auch noch, wenn auf das Wasser in der Röhre ein Druck ausgeübt und der Deckel dadurch gehoben wird. Befindet sich zwischen dem Deckel und einer festen Platte ein Körper, so sieht man hiernach wohl, wie er durch den Druck des Wassers gegen den Deckel zusammengepreßt werden kann. Um einen bedeutenden Druck auszuüben, gebraucht man eine hydraulische Presse, welche aus einer Saug- und Druckpumpe, die den Druck ausübt, und einem Cylinder mit einem Kolben und einer Platte besteht, welche letztere den Druck empfängt und auf den zu pressenden Körper überträgt. —

Auf dem Luftdrucke und den Gleichgewichtsgesetzen schwerer tropfbarer Flüssigkeiten beruhen auch die Wirkungen der Taucherglocke, der Wasserstoff-Zündmaschine, des anatomischen Hebers, und einer großen Menge physicalischer Spielwerke, wie der intermittirende Brunnen, der

Digitized by Google

Storch, der Verirbecher, das magiſche Tintenfaß, der magiſche Trichter, das Sieb der Veſtalin, der Oelkrug der Wittwe, u. dgl.

108. Wie in einer tropfbaren Flüſſigkeit, ſo verliert auch ein Körper in der Luft oder irgend einem anderen Gaſe ſo viel von ſeinem Gewichte als die verdrängte Gasmaſſe beträgt. Hieraus folgt, daß man das abſolute Gewicht eines Körpers nur im luftleeren Raume jedesmal richtig erfährt, in der Luft aber nur dann, wenn er mit dem Gegengewichte gleiche Dichtigkeit hat. Außerdem iſt eine Correction anzubringen, welche jedoch bei gewöhnlichen Gewichtsbeſtimmungen vernachläſſigt werden kann. Auch erkennt man, daß jeder Körper, der weniger wiegt als ein gleiches Volumen Luft, in dieſer aufſteigen muß, gerade ſo wie in einer tropfbaren Flüſſigkeit unter gleichen Umſtänden. Hierauf beruht auch das Steigen des Luftballons. Gewöhnlich conſtruirt man einen ſolchen Ballon aus überfirnißtem Papier oder Taffet und füllte ihn anfänglich mit verdünnter atmoſphäriſcher Luft, indem man unter eine Oeffnung deſſelben einen Korb von Metalldraht hing, in welchem durch ein Feuer die Luft erwärmt und ausgedehnt wurde. Die alſo erwärmte und leichtere Luft ſtieg durch die Oeffnung in den Ballon und füllte ihn ganz aus; er mußte ſteigen, ſobald das Gewicht der warmen Luft nebſt Hülle und Allem, was daran hing, geringer war als das Gewicht der verdrängten Luftmaſſe. Da aber der Ballon in immer dünnere Luftſchichten gelangt, ſo hat das Steigen eine Grenze, und zwar dann, wann ſein Geſammtgewicht dem Gewichte der Luft gleich geworden iſt. Die bewegende Kraft eines Ballons, welcher ſich vertical in der Luft erhebt, läßt ſich in jedem gegebenen Falle berechnen, denn dieſe Kraft iſt nichts anderes als der Ueberſchuß des Gewichtes der Luft, die er in jedem Augenblicke aus ihrer Stelle treibt, über ſein eigenes Gewicht. — Die Gebrüder Montgolfier ließen zuerſt einen Ballon der obigen Art im Jahre 1783 aufſteigen. Charles erhöhte die Steigkraft des Ballons dadurch bedeutend, daß er ihn mit Waſſerſtoffgas füllte, welches 14 Mal leichter als Luft iſt. Der engliſche Luftſchiffer Green füllte den Ballon mit Kohlenwaſſerſtoffgas, welches ſich bei der Deſtillation von Steinkohlen entwickelt.

Digitized by Google

Fünfter Abschnitt.

Von den Bewegungsgesetzen tropfbarer und gasförmiger Körper.

Erstes Kapitel.

Von der Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten.

109. Man betrachte eine schwere Flüssigkeit, welche aus einem Gefäße durch eine kleine Oeffnung am Boden fließt. Die außerordentlich dünnen, horizontalen Schichten, in welche man sich die Flüssigkeit getheilt denken kann, werden sich während des Ausflusses nach und nach ersetzen, indem sie unter einander parallel bleiben. Jede Schicht ist während der ganzen Dauer der Bewegung aus denselben Theilchen zusammengesetzt und alle Theilchen derselben horizontalen Schicht haben dieselbe Geschwindigkeit. Betrachtet man nun die kleine Flüssigkeitssäule abcd gerade über der Oeffnung ohne Rücksicht auf die über cd befindliche Flüssigkeit, so muß sie offenbar die Oeffnung ab mit einer Geschwindigkeit verlassen, welche ihrer Höhe ac entspricht. Hierzu kommt aber noch der Druck der ganzen über cd liegenden Flüssigkeit, welcher den Ausfluß beschleunigt. Die wirkl.che Geschwindigkeit, mit welcher die Flüssigkeitstheilchen die Oeffnung verlassen, entspricht also der Höhe ae der Flüssigkeit im Gefäße. Nun gehört aber nach §. 53 zur Höhe ae — h die Geschwindigkeit $c = \sqrt{2gh}$. Man sieht also, daß die Geschwindigkeit einer Flüssigkeit, welche durch eine sehr kleine Oeffnung aus einem Gefäße fließt, gerade so groß ist wie diejenige, welche ein Körper im leeren Raume erlangen würde, wenn

Digitized by Google

er von einer Höhe fiele, die der des Niveau's der Flüssigkeit über der Oeffnung gleich ist.

Dieses Resultat gilt auch noch, wenn die Flüssigkeit durch irgend eine Seitenöffnung abfließt, da die Flüssigkeitsschichten über der Oeffnung hier wie dort parallel mit sich selbst herabsinken.

Bringt man kleine Körperchen in die Flüssigkeit, so bemerkt man, daß dieselben, indem sie die Bewegung der Flüssigkeit annehmen, wirklich vertical herabfallen, mit einer Geschwindigkeit, welche für alle Theilchen derselben horizontalen Schicht dieselbe ist; nur in der Nähe der Oeffnung nehmen sie gegen diese geneigte Richtungen an, welche sie auch außerhalb des Gefäßes noch behalten. Hieraus folgt eine Zusammenziehung des herausfließenden Strahles, welche in einer gewissen Entfernung von der Oeffnung ihren größten Werth erreicht und dann constant bleibt. Während nämlich die verticale gerade über der Oeffnung stehende Flüssigkeitssäule ausfließt, zieht sie sich in die Länge, wodurch ihr Durchmesser etwas abnimmt; dies veranlaßt die seitwärts liegenden Theilchen zu einer Seitenbewegung, so daß sie in geneigten Richtungen die Oeffnung durchfließen. Man sieht aber leicht, daß sie die Oeffnung mit geringerer Geschwindigkeit verlassen müssen als die Theilchen, welche im verticalen Sinne herabkommen und den centralen Theil des herausfließenden Strahles bilden. Dies gilt sowohl für eine Boden- als auch für eine Seitenöffnung.

110. Es ist klar, daß das Volumen V der Flüssigkeit, welches in der Zeiteinheit, etwa in 1 Secunde, durch eine Oeffnung abfließt, von der Größe des Querschnittes der Oeffnung und von der Ausflußgeschwindigkeit abhängt, so daß es seinen Ausdruck in der Formel $V = b \cdot c$ findet, wenn b den Flächeninhalt des Querschnitts und c die Ausflußgeschwindigkeit bezeichnet. Die Geschwindigkeit hängt aber von der Druckhöhe h ab, so daß nach dem Obigen $c = \sqrt{2gh}$ ist. Mithin hat man für die Ausflußmenge in der Zeit t die Formel

$$V = bt\sqrt{2gh}.$$

Diese Formel setzt voraus, daß alle Flüssigkeitstheilchen die Oeffnung mit der Geschwindigkeit verlassen, welche gerade der Druckhöhe h entspricht. Wir haben aber oben gesehen, daß dies in der Wirklichkeit nicht der Fall ist, daß vielmehr nur die Theilchen in der Mitte der Oeffnung diese Geschwindigkeit haben, während die Theilchen am Rande der Oeffnung sich mit einer geringeren Geschwin-

Digitized by Google

digkeit fortbewegen. Aus diesem Grunde ist die wirkliche Ausflußmenge von der nach der obigen Formel berechneten verschieden; sie gleicht derjenigen, welche stattfinden würde, wenn der Querschnitt der Oeffnung gleich dem Querschnitte des Strahles an der Stelle seiner größten Zusammenziehung wäre. Bezeichnet man den letzteren Querschnitt durch b' und seinen verticalen Abstand vom Niveau der Flüssigkeit im Gefäße durch h', so hat man für die wirkliche Ausflußmenge $b' t \sqrt{2gh'}$ oder auch $b' t \sqrt{2gh}$, insofern h von h' nur sehr wenig verschieden ist. Aus Versuchen findet man $b' = (0{,}64)\, b$, also in der Wirklichkeit $V = 0{,}64\, b t \sqrt{2gh}$.

111. Bringt man an die in eine dünne Wand gemachte Oeffnung außerhalb des Gefäßes eine cylindrische Ansatzröhre an, durch welche nun der Ausfluß geschieht, so bemerkt man, daß die Ausflußmenge vermehrt wird. Doch findet dies nicht unter allen Umständen statt. Die Flüssigkeit erleidet nämlich in der Ansatzröhre dieselbe Zusammenziehung, als wenn sie blos aus einer gewöhnlichen Oeffnung hervorströmte. Ueber den Punkt der größten Zusammenziehung hinaus aber, wenn einmal die Röhrenwand benetzt ist, wird die Röhre eben in Folge der Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und der Röhrenwand vollständig ausgefüllt. Der Querschnitt des heraustretenden Strahles ist also durch die Ansatzröhre vergrößert worden, woraus die Vermehrung der Ausflußmenge folgt. Giebt man der Ansatzröhre die Gestalt des zusammengezogenen Strahles, so erfolgt der Ausfluß

auf dieselbe Weise, als wenn die Röhre durchweg cylindrisch wäre. Wenn nun unter der Voraussetzung, daß die Röhre von der Flüssigkeit ganz ausgefüllt ist, die letztere die erstere mit einer Geschwindigkeit verläßt, welche der Stelle der größten Zusammenziehung entspricht, so müßte in der Röhre ein Zerreißen der nach einander ausströmenden Schichten erfolgen; denn durch den größeren Querschnitt cd fließt in der Zeiteinheit jedenfalls mehr als durch ab, den Querschnitt der größten Zusammenziehung des Strahles. Der äußere Luftdruck aber, welcher einerseits auf die Oberfläche der Flüssigkeit im Gefäße, andererseits gegen die Oeffnung wirkt, beschleunigt dort den Einfluß in die Röhre, während er hier den Ausfluß aus derselben verzögert. Beides zusammen bewirkt einen vollen Ausfluß aus der Ansatzröhre und somit eine Vermehrung der Ausflußmenge. Zur Bestätigung dessen mache man in die Ansatzröhre ein Loch; sogleich verliert der Strahl seinen stetigen Ausfluß, indem durch die Oeffnung Luft eingesaugt wird. Bringt man in die Oeffnung eine gebogene Röhre, deren unteres Ende in ein Gefäß mit

Digitized by Google

Wasser reicht, so wird Wasser in der Röhre in die Höhe gesaugt, da nach dem Obigen das Wasser in der Röhre einen leeren Raum zu bilden sucht.

Dasselbe, was wir bisher von einer cylindrischen Ansatzröhre entwickelt haben, gilt auch von einer conischen, nur daß durch sie eine noch größere Ausflußmenge hervorgebracht wird.

Soll also durch eine solche Ansatzröhre die Ausflußmenge vermehrt werden, so ist es nothwendig, daß die Flüssigkeit die Röhre benetzt und vollständig ausfüllt, da nur hierdurch der Querschnitt des ausfließenden Strahles vergrößert werden kann. Fließt der Strahl frei durch, so ist die Röhre ohne allen Einfluß. Das Anhängen des Strahles an die Röhrenwand hängt aber von der Geschwindigkeit des Ausflusses oder, was dasselbe ist, von der Druckhöhe ab. Bei großer Geschwindigkeit oder bedeutender Druckhöhe geht der Strahl frei durch, während er sich bei einer geringeren Druckhöhe anhängt. Bei einer mittleren Druckhöhe hat man es in der Gewalt, den Strahl bald frei, bald anhängend zu machen, je nachdem man durch ein geringes Hinderniß die Geschwindigkeit des Ausflusses verzögert oder durch einen Stoß beschleunigt, in welchem letzteren Falle der Strahl frei wird. Die Ausflußgeschwindigkeit wird also in demselben Verhältnisse vermindert, in welchem die Ausflußmenge vermehrt wird, so daß die sogenannte Bewegungsgröße (das Product aus der Masse in die Geschwindigkeit) dieselbe bleibt. —

Ist das Niveau der Flüssigkeit im Gefäße nicht constant, d. h. wird das Gefäß nicht durch beständigen Nachfluß voll erhalten, so muß die Ausflußgeschwindigkeit, wie man sogleich sieht, mit der Quadratwurzel aus der Druckhöhe abnehmen.

112. Sobald der Wasserstrahl in horizontaler Richtung aus einer Oeffnung herausgetreten ist, nimmt er eine Bewegung an, welche mit der eines schweren, horizontal geworfenen Körpers übereinkommt; denn die Schwere lenkt den Strahl fortwährend von der horizontalen Richtung ab. Der Strahl muß also eine Parabel beschreiben, deren Gestalt offenbar von der Ausflußgeschwindigkeit abhängt. Kennt man die letztere, welche sich nach der Formel $c = \sqrt{2gh}$ aus der bekannten Druckhöhe berechnen läßt, so kann man nach §. 55 die Gestalt der Parabel leicht durch Rechnung und Construction finden und sie mit der wirklichen Gestalt vergleichen.

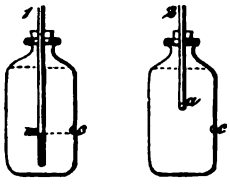
Tritt der Wasserstrahl in verticaler Richtung aus einer Oeffnung hervor, so sollte er mit einer Geschwindigkeit in die Höhe steigen,

Digitized by Google

welche der Druckhöhe entspricht, d. h. er sollte sich bis zum Niveau der Flüssigkeit im Gefäße erheben. Aber Bewegungshindernisse, wie Reibung an den Rändern der Oeffnung und Luftwiderstand, lassen ihn zu dieser Höhe nicht kommen; auch der Druck der vom Gipfel der Säule wieder herabfallenden Tropfen wirkt entgegen, so daß der Strahl immer höher springt, wenn er etwas von der verticalen Richtung abweicht.

113. Um die bisher besprochenen Erscheinungen bequem durch den Versuch darzustellen, bedient man sich zweckmäßig eines hinreichend weiten cylindrischen Blechgefäßes, welches mit mehreren Oeffnungen versehen ist. Zwei Oeffnungen befinden sich an der Seitenwand und eine dritte im Boden des Gefäßes. Der Ausfluß selbst geschieht durch Oeffnungen in dünnen Metallplatten, welche in die Gefäßöffnungen eingeschraubt werden können. Eine vierte Oeffnung ist endlich nahe am Boden des Gefäßes angebracht; sie befindet sich in einer horizontalen Röhre, welche in einer etwas weiteren Röhre steckt und in dieser um ihre Are gedreht werden kann. Hierdurch wird es möglich, dem ausfließenden Strahle jede beliebige Richtung zu geben. Innerhalb des Gefäßes befindet sich vor jeder Oeffnung eine Klappe, welche mittels eines Fadens gehoben werden kann, so daß man den Abfluß des Wassers aus der Oeffnung nach Willkür unterbrechen und wieder herstellen kann. —

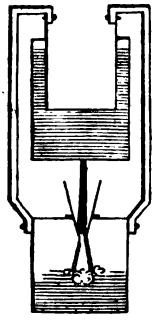
Damit Wasser aus einem Gefäße ohne Nachfluß mit constanter Geschwindigkeit ausfließe, gebraucht man die Mariotte'sche Flasche. Den Hals der Flasche verschließt ein Kork, durch welchen luftdicht eine oben und unten offene Glasröhre geht, die aber in die Höhe gezogen und hinabgedrückt werden kann. Bei c befindet sich eine kleine Ausflußöffnung. Ist nun die Flasche mit Wasser gefüllt und steht das letztere in der Röhre eben so hoch als in der Flasche, so fließt es bei c aus, sofern das untere Ende der Röhre tiefer steht als die Ausflußöffnung. Das Ausfließen hat ein Ende, sobald das Wasser in der Röhre bis zum Punkte m, welcher mit c in gleicher Höhe liegt, herabgefallen ist. Der äußere atmosphärische Druck ist nämlich dann im Gleichgewichte mit der über m befindlichen Wassermasse im Gefäße und dem Drucke der Luft im oberen Theile des Gefäßes. Zieht man nun die Röhre so weit in die Höhe, daß ihr unteres Ende oberhalb der Ausflußöffnung liegt, wie in 2,



Digitized by Google

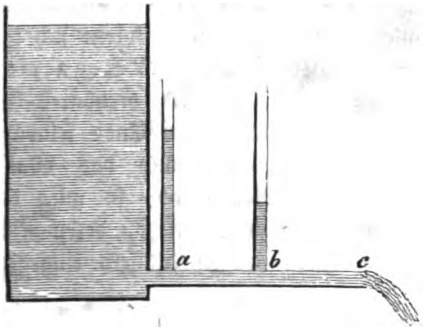
so geschieht der Ausfluß mit constanter Geschwindigkeit, während Luftblasen durch das Wasser in den oberen Theil des Gefäßes steigen. Die Ausflußgeschwindigkeit entspricht einer Druckhöhe, welche gleich der Höhe des unteren Endes der Röhre über der Oeffnung c ist. So lange sich nun der Wasserspiegel im Gefäße oberhalb a befindet, bleibt die erwähnte Druckhöhe dieselbe und daher auch jene Geschwindigkeit constant; dabei wird dem Drucke der Wassermasse über a durch den äußeren Luftdruck das Gleichgewicht gehalten. Sobald das Wasser bis a herabgekommen ist, hört freilich das gleichmäßige Ausfließen auf, und es findet natürlich gar kein Ausfluß mehr statt, wenn das Wasser mit c in gleicher Höhe steht.

Zur Erreichung einer constanten Druckhöhe dient auch der sogenannte Schwimmer von Prony. Die Figur zeigt, wie im Ausflußgefäße ein Kasten schwimmt, welcher durch Stäbe mit einem zweiten Kasten verbunden ist, in den durch einen Trichter das Wasser des Gefäßes fließt. Man sieht leicht, daß das Niveau des Wassers constant bleibt, weil in demselben Verhältnisse, in welchem das Wasser aus dem Gefäße fließt, der zweite Kasten schwerer wird und der erste in eben dem Maße tiefer einsinken muß. Auf diese Weise wird also der Raum des ausgeflossenen Wassers durch den ersten Kasten immer wieder ersetzt.



114. Wenn eine Flüssigkeit, wie Wasser, aus einem Gefäße durch eine horizontale Röhre abfließt, so sollte es in dieser eine Geschwindigkeit haben, welche der Höhe des Niveau's der Flüssigkeit über der Oeffnung entspricht. Aber ein großer Theil dieser Geschwindigkeit geht durch Reibungswiderstände verloren. Der Reibungswiderstand ist um so mächtiger, je enger und länger die Röhre ist, so daß er mit dem Durchmesser der Röhre im umgekehrten und mit ihrer Länge im geraden Verhältnisse steht. Bewegte sich das Wasser in der Röhre mit der Geschwindigkeit, welche der Druckhöhe gerade entspricht, so würden die Röhrenwände keinen Druck auszuhalten haben; aber aus der Verzögerung der Geschwindigkeit durch Reibungswiderstand entsteht ein hydrostatischer Druck des Wassers auf die Wände von innen nach außen. Dieser Druck nimmt immer ab, wenn man sich der Ausflußöffnung nähert. Macht man bei a eine Oeffnung und setzt in dieselbe vertical eine Glasröhre, so muß in der letzteren das Wasser bis zu einer Höhe steigen, welche dem hydrostati-

Digitized by Google



schen Drucke an dieser Stelle entspricht. Dieser Druck rührt von den Bewegungshindernissen in dem Röhrenstücke von a bis c her und hält ihnen das Gleichgewicht. In der Mitte von a c bei b würde das Wasser nur halb so hoch steigen, weil der Reibungswiderstand in b c nur halb so groß als in a c ist, u. s. f.

Ist aber die Geschwindigkeit des Wassers in der Röhre größer als diejenige, welche der Druckhöhe entspricht, so fällt nicht allein der eben besprochene Druck von innen nach außen weg, sondern die Röhrenwände erleiden nun sogar einen Druck von außen nach innen und zwar in Folge des überwiegenden äußeren Luftdruckes.

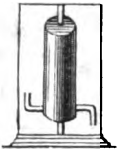
Fließt eine Flüssigkeit aus einem Gefäße durch ein enges Röhrchen, dessen Wände sie nicht benetzt, so hört bei einer gewissen Verminderung der Druckhöhe der Ausfluß ganz auf. Wir wissen aber, daß eine Flüssigkeit in einem engen Röhrchen, dessen Wände sie nicht benetzt, einen converen Meniscus bildet, welcher auf die flüssige Säule einen bestimmten Druck ausübt. Sobald dieser Druck dem Drucke der Flüssigkeit im Gefäße gleich oder gar größer als dieser ist, muß natürlich das Ausfließen ein Ende haben. Dabei ist besonders die Weite der Röhre von Wichtigkeit. —

Uebrigens scheint die Ausflußgeschwindigkeit einer Flüssigkeit mit ihrer Temperatur zu wachsen; so hat man die bestimmte Erfahrung gemacht, daß bis zu 100° C. erwärmtes Wasser in einer Glasröhre beinahe 4 Mal schneller als Wasser von 0° C. ausfließt.

115. Wenn sich Wasser in einem Gefäße im Gleichgewichte befindet, so wissen wir, daß jeder Druck durch einen gleichen, aber entgegengesetzten aufgehoben wird. Dies gilt natürlich auch von dem Seitendrucke auf die Wände des Gefäßes. Macht man aber ein Loch an irgend einer Stelle der Wand, so muß hier das Wasser hervorspringen, der Seitendruck auf diese Stelle der Wand fällt weg, während die gerade gegenüberstehende Stelle der Wand noch denselben Druck wie vorher auszuhalten hat. Das Gefäß wird sich also

Digitized by Google

in der Richtung dieses letzteren Druckes oder im entgegengesetzten Sinne des ausfließenden Wassers bewegen müssen, sofern sich kein Bewegungshinderniß entgegenstellt. Hierauf beruht das Segnersche Wasserrad, ein cylindrisches, um eine verticale Axe drehbares Gefäß, welches unten zwei horizontale, am Ende seitwärts gebogene Ausflußröhren hat. Fließt nun das Wasser aus dem Gefäße durch diese Röhren ab, so wird das Gefäß in eine drehende Bewegung versetzt, deren Richtung der Richtung des ausfließenden Wassers entgegengesetzt ist.



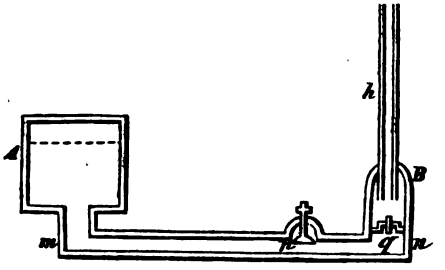
116. Befindet sich ein Körper in fließendem Wasser, so hat er natürlich einen bestimmten Druck auszuhalten. Ist dieser Druck senkrecht gegen eine Seitenfläche des Körpers, so ist er gleich dem Gewichte einer Wassersäule, deren Basis gleich der Fläche und deren Höhe die zu der Geschwindigkeit des Wassers gehörige Fallhöhe ist. Man bezeichne die Größe der gedrückten Fläche durch b, die Geschwindigkeit des Wassers durch c, dann ist nach §. 53 die der Geschwindigkeit c entsprechende Fallhöhe $\frac{c^2}{2g}$ und der Druck selbst also gleich $\frac{bc^2}{2g}$. Ist der Druck schief gegen die Fläche gerichtet, so kann man ihn doch mit Hilfe des Parallelogrammes der Kräfte berechnen. —

Wenn Wasser eine Anhöhe herabfließt, so muß sein Druck am Fuße der Anhöhe vom Höhenunterschiede des Fußpunktes und des höchsten Punktes des Gefälles abhängen. Fällt nun in der Zeiteinheit eine Wassermasse M von der Höhe h herab, so ist bekanntlich Mh die Bewegungsgröße oder auch das sogenannte mechanische Moment des Gefälles, welches sich als bewegende Kraft benutzen läßt, z. B. zur Drehung von Rädern, auf deren Umfang das Wasser durch Druck oder Stoß wirkt. Man erkennt leicht, daß der Effect des Gefälles dem mechanischen Momente genau entsprechen muß, denn die bewegende Kraft Mh kann im besten Falle nicht mehr leisten als eine Masse M in der Zeiteinheit auf eine Höhe h heben. Aber wegen Belastung des Rades, wegen unvermeidlicher Bewegungshindernisse (wie Reibung u. dgl.) kommt nur ein verhältnißmäßig kleiner Theil des mechanischen Moments zur Wirkung, wie man dies in hydraulischen Werken zur Genüge ersehen kann. —

Eine nicht uninteressante Erscheinung, welche auf der Verände-

Digitized by Google

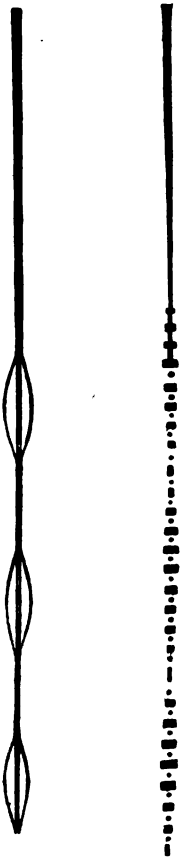
rung des Druckes von fließendem Wasser beruht, gewährt der sogenannte Stoßheber oder hydraulische Widder. Es sei A ein



Gefäß mit Wasser, mn eine lange Röhre, die mit dem Gefäße B durch eine Klappe, welche sich von unten nach oben öffnet, in Verbindung steht. In der Röhre bei p befindet sich ebenfalls eine Klappe oder ein Ventil, welches durch den Druck des Wassers geschlossen werden kann, außerdem aber durch sein Gewicht herabhängt. Fließt nun das Wasser aus dem Gefäße A in die Röhre mn, so wird es sich in dieser mit einer Geschwindigkeit bewegen, welche der Höhe des Wassers in A entspricht; aber bald stößt es an die Klappe p, welche sich schließt; hierdurch wird sein Lauf plötzlich gehemmt, es entsteht in Folge dessen ein Druck auf alle Röhrenwände, welcher das Wasser in das Gefäß B mit einer Geschwindigkeit treibt, welche größer ist als die der Druckhöhe entsprechende. Dabei geht es vermöge der einmal erlangten Geschwindigkeit weiter, als gerade zum Gleichgewichte erforderlich ist. Deshalb geht das Wasser in der Röhre wieder nach dem Gefäße hin zurück, während sich die Klappe q schließt und die Klappe p herabfällt. Dann bewegt es sich wieder gegen die Klappen hin, schließt die eine, öffnet die andere und dringt zum zweiten Male in das Gefäß B. Diese pendelartigen Bewegungen wiederholen sich rasch, so daß das Wasser im Gefäße B durch den Druck der über ihm comprimirten Luft, wie in einem Heronsballe, innerhalb der Röhre h aufsteigen muß. — Uebrigens kann man sich statt des Gefäßes A auch eine Quelle denken, welche in einer gewissen Höhe über der Röhre mn liegt.

116. Betrachten wir noch einmal einen Wasserstrahl, nachdem er die Oeffnung eines Gefäßes verlassen hat, etwas genauer in seinem Laufe. Man wird alsdann zwei leicht zu unterscheidende

Digitized by Google



Theile bemerken. Der erste, welcher der Oeffnung zunächst liegt, ist (Fig. 1) ruhig und durchsichtig wie ein massiver Glasstab, der andere aber ist unruhig, undurchsichtig und besteht aus einer Anzahl durch gleiche Zwischenräume getrennter Anschwellungen. Savart hat diesen zweiten Theil des Strahles näher untersucht; nach ihm ist er aus einer Reihe von Tropfen zusammengesetzt, dergestalt, daß die Anschwellungen aus breiten, in horizontaler Richtung ausgedehnten Tropfen, die gleichen Zwischenräume (Knoten) aber aus schmalen, in verticaler Richtung verlängerten Tropfen bestehen. Die Anschwellungen und Knoten haben eine unveränderliche Stellung, woraus folgt, daß ein und derselbe Tropfen abwechselnd breit und lang wird, je nachdem er sich an der Stelle einer Anschwellung oder eines Knotens befindet. Jeder Tropfen geht also in regelmäßigen Perioden aus einer Gestalt in die andere über.

Zweites Kapitel.

Bewegung gasförmiger Körper.

117. Ist ein Gas in einem Gefäße abgesperrt, so wird es aus einer Oeffnung desselben im Ganzen nach denselben Gesetzen ausströmen, wie eine tropfbare Flüssigkeit, vorausgesetzt, daß das Gas im Gefäße stärker comprimirt ist, also mehr Spannkraft besitzt, als die äußere Luft. Die Ausflußgeschwindigkeit läßt sich auch hier nach der Formel $c = \sqrt{2gh}$, welche für tropfbare Flüssigkeiten gilt, berechnen, obschon h nicht gleich der Höhe der gegebenen Gassäule ist. Man bestimmt den Druck, welcher das Gas zum Ausflusse nöthigt,

Digitized by Google

insgemein durch die Höhe der Waſſer- oder Queckſilberſäule eines Manometers.

Nehmen wir an, daß Luft unter dem gewöhnlichen atmoſphäriſchen Drucke in einen luftleeren Raum ſtrömt. Bekanntlich ſteht der atmoſphäriſche Druck mit einer Queckſilberſäule von 28 Zoll oder mit einer Waſſerſäule von 32′ — 10,4 Mtr. im Gleichgewichte. Unter dieſen Umſtänden iſt aber die Dichtigkeit der Luft 770 Mal geringer als die des Waſſers, und eine Luftſäule, welche in ihrer ganzen Ausdehnung dieſe Dichtigkeit hat, muß 10,4 . 770 — 8008 Mtr. hoch ſein, um dem geſammten atmoſphäriſchen Drucke das Gleichgewicht zu halten. Dies iſt alſo der Werth, welcher in obiger Formel für h ſubſtituirt werden muß, um die Geſchwindigkeit des Ausſtrömens der Luft in den leeren Raum zu erhalten.

Uebrigens iſt die Ausflußgeſchwindigkeit der Luft unabhängig von der Größe des Druckes, welcher das Einſtrömen in den leeren Raum bewirkt, wie ohne Weiteres aus der Natur der Gaſe hervorgeht. Denn in demſelben Verhältniß, in welchem der Druck vermindert wird, nimmt auch die Dichtigkeit der Luft ab, ſo daß ſie z. B. für die Hälfte des atmoſphäriſchen Druckes auch nur noch halb ſo groß iſt.

118. Wenn Luft aus einem Gefäße in einen Raum ſtrömt, der gleichfalls Luft, aber von geringerer Spannung, enthält, ſo kann die Geſchwindigkeit des Ausſtrömens natürlich nur von der Differenz der Spannung der äußeren und der im Gefäße befindlichen Luft abhängen. Sei das Uebergewicht des inneren über den äußeren Druck am Manometer durch eine Waſſerſäule gemeſſen, deren Höhe gleich h ſein mag. Man kann dieſen Unterſchied ſo betrachten, als ob er durch das Gewicht einer Luftſäule von derſelben Spannkraft wie die äußere Luft hervorgebracht werde, falls dieſe Gasſäule nur eine entſprechende Höhe hat. Iſt nun die Dichtigkeit des eingeſchloſſenen Gaſes gleich d, die des Waſſers als Einheit angenommen, ſo iſt die entſprechende Höhe jener Gasſäule gleich $\frac{h}{d}$ und die Geſchwindigkeit des ausſtrömenden Gaſes $c = \sqrt{2 g \frac{h}{d}}$. Man ſieht, daß ſich die Ausflußgeſchwindigkeit umgekehrt verhält wie die Quadratwurzel aus der Dichtigkeit der Gaſe. So iſt die Geſchwindigkeit des Waſſerſtoffes faſt 4 Mal größer als die des Sauerſtoffes, weil erſterer beinahe 16 Mal weniger dicht iſt und folglich als Gasſäule eine beinahe 16 Mal größere Höhe beſitzen muß, wenn ſie denſelben Druck ausüben ſoll, wie eine Sauerſtoffſäule.

Digitized by Google

Wenden wir nun obige Formel auf Luft an, welche in einem Gefäße comprimirt ist und aus diesem in die freie atmosphärische Luft strömt. Die mittlere Dichtigkeit der atmosphärischen Luft ist gleich $\frac{1}{770}$ von der des Wassers bei einem Barometerstande b von 32', wenn man nämlich den Druck durch eine Wassersäule mißt. Der Druck der eingeschlossenen Luft ist aber gleich $b + h$, also ihre Dichtigkeit im Verhältnisse von $b + h : b$ oder $\frac{b + h}{b}$ Mal größer als die der gewöhnlichen atmosphärischen Luft. Demnach ist hier $d = \frac{b + h}{770\ b}$ und $c = \sqrt{2\,g\,\frac{770\,b\,h}{b + h}}$.

Multiplicirt man diesen Werth von c mit dem Querschnitte der Oeffnung, so erhält man die Ausflußmenge in einer Secunde, und durch weitere Multiplication mit t für eine beliebige Zeit.

Aber auch hier zeigt die Erfahrung, daß wie bei tropfbaren Flüssigkeiten die wirkliche Ausflußmenge kleiner ist als die theoretisch berechnete. Auch hier muß die theoretische Ausflußmenge mit einem Factor multiplicirt werden, um die wirkliche zu erhalten. Während aber bei Wasser dieser Coefficient (0,64) beinahe unabhängig von der Druckhöhe ist, zeigt er bei Gasen eine große Veränderlichkeit. Nach Schmidt beträgt er bei einer Druckhöhe von 3 Fuß ungefähr 0,52; nach d'Aubuisson's Versuchen innerhalb der Druckhöhen von 0,1 bis 0,5 Fuß 0,65. Für geringe Druckhöhen hat über diesen Punkt Buff genaue Versuche angestellt. Auch cylindrische und conische Ansatzröhren vermehren die Ausflußgeschwindigkeit, und zwar ist sie für conische am größten, wenn die äußeren Durchmesser sich wie 1 : 2 verhalten und die Länge den Durchmesser 5 — 10 Mal übertrifft. Es unterliegt wohl keinem Zweifel, daß der Unterschied zwischen der theoretischen und wirklichen Ausflußmenge, wie bei tropfbaren Flüssigkeiten, seinen Grund in einer Zusammenziehung des Luftstrahles hat.

119. Um ein ununterbrochenes, regelmäßiges Ausströmen von Gasen zu bewirken, bedient man sich gewöhnlich der sogenannten Gasometer, wie man sie in chemischen Laboratorien und Gasbeleuchtungsanstalten findet. Unser gewöhnlicher Blasbalg liefert keinen regelmäßigen Luftstrom, weshalb man in Schmieden einen doppelten Blasbalg anwendet. Bei Hohöfen und starken Schmiedefeuern gebraucht man sogenannte Gebläse, von denen das Cylindergebläse das zweckmäßigste und jetzt auch das gebräuchlichste ist.

120. Die Bewegung der Gase in Röhrenleitungen geschieht im

Digitized by Google

Ganzen nach denselben Gesetzen, welche in ähnlichen Fällen für tropfbare Flüssigkeiten gelten. Ein Theil der Spannung des Gases geht für die Bewegung verloren, insofern er dazu dient, den Reibungswiderstand zu überwinden. Auch nimmt der Druck, welchen die Röhrenwände von dem Gase auszuhalten haben, um so mehr ab, je mehr man sich der Mündung der Röhre nähert. Gase von verschiedenem specif. Gewichte erleiden denselben Widerstand, welcher dem Quadrate ihrer mittleren Geschwindigkeiten proportional ist. Die Quantitäten der aus einer gegebenen Röhrenleitung ausströmenden Gase stehen im geraden Verhältnisse zu dem im Reservoir stattfindenden Drucke und im umgekehrten zu der Quadratwurzel der Länge der Leitungsröhren.

121. Wie bewegtes Wasser, so übt auch bewegte Luft gegen ein Hinderniß einen bestimmten Druck aus. Nachdem sich aber die Luft beim Anstoßen verdichtet hat, muß sie sich bald darauf wegen ihrer Elasticität wieder ausdehnen, so daß sie also gleich einem elastischen Körper auf das Hinderniß wirkt. —

Wenn comprimirte Luft aus der Oeffnung eines Gefäßes durch eine frei hervorstehende Röhre strömt, so wird eine gegenüberstehende bewegliche Platte, wie natürlich, von dem Luftstrome fortgestoßen. Dies findet aber nicht mehr statt, wenn man die Röhre ganz in der Nähe der Ausflußöffnung durch eine Scheibe steckt. In diesem Falle bewegt sich nämlich die Platte bei einer gewissen Entfernung dem Luftstrome entgegen nach der Scheibe hin, indem dabei die Luft mit großem Geräusche zwischen der Platte und Scheibe entweicht. Uebrigens bemerkt man diese Erscheinung auch, wenn die Luft unmittelbar aus einer Oeffnung der Gefäßwand gegen die Platte strömt.

Nach Clement und Desormes, welche dieses Phänomen zuerst beschrieben, hat es denselben Grund, wie die Vermehrung der Ausflußmenge des Wassers durch ein conisches Ansatzrohr. Die Luft, nachdem sie die Oeffnung verlassen, breitet sich in einer dünnen Schicht zwischen der Scheibe und der Platte aus, und dies um so mehr, je mehr sie sich dem Rande der Platte nähert. Indem sich nun zwischen der Scheibe und Platte ein luftverdünnter Raum bildet, wird von der äußeren atmosphärischen Luft die bewegliche Platte an die Scheibe gedrückt.

Um diese Erscheinung im Kleinen darzustellen, blase man mit dem Munde durch eine Röhre, welche sich in einer Scheibe endigt, in deren Mitte sich die Ausflußöffnung befindet, und nähere der letzteren während des Durchblasens ein Kartenblatt.

Digitized by Google

Sechster Abschnitt.

Von der Akustik.

Erstes Kapitel.

Von der Wellenbewegung im Allgemeinen und den Gesetzen des Schalles insbesondere.

122. Alle cohärente Materie beruht, wie wir wissen, auf einem Gleichgewichte der Attraction und Repulsion ihrer Theile. Werden nun die Theilchen durch irgend eine Ursache aus der diesem Gleichgewichte entsprechenden Lage entfernt und dann sich selbst überlassen, so müssen sie nothwendiger Weise in Folge ihres Strebens, in die Lage des Gleichgewichts zurückzukehren, um die letztere Schwingungen machen. Auch sieht man ein, daß sich die schwingende Bewegung, wenn das innere Gleichgewicht eines Körpers an einer bestimmten Stelle aufgehoben ist, vermöge der Wechselwirkung der einzelnen Theilchen von den unmittelbar getroffenen zu den benachbarten fortpflanzen muß. Die Bewegung schreitet hier von Theilchen zu Theilchen fort, so daß jedes folgende, wenn gleich später, dieselben Schwingungen macht wie das vorhergehende. Eine schwingende Bewegung dieser Art nennt man eigentlich eine **Wellenbewegung**. Es ist klar, daß hierbei sowohl die Art und Weise der ursprünglichen Störung des Gleichgewichtes als auch die besondere Beschaffenheit des Körpers hinsichtlich des Zusammenhanges seiner Theilchen von Bedeutung sein muß.

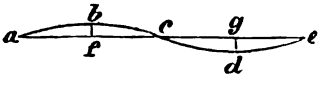
Dann kann aber auch die Bewegung der Theilchen eines Körpers so beschaffen sein, daß alle gleichzeitig ihre Schwingungen beginnen und vollenden. Solche Schwingungen nennt man **stehende**.

Digitized by Google

Beide Schwingungsarten werden wir bald näher kennen lernen. Vorerſt wollen wir die Wellenbewegungen tropfbarer Flüſſigkeiten, insbeſondere des Waſſers, etwas näher betrachten.

123. Die fortſchreitenden Schwingungen, welche wir an tropfbaren Flüſſigkeiten beobachten, verdanken ihr Daſein vorzugsweiſe der Einwirkung der Schwere auf die einzelnen Theilchen. Sobald das Gleichgewicht einer horizontalen Waſſerfläche auf irgend eine Art geſtört wird, indem man etwa an einer Stelle eine Erhöhung oder Vertiefung hervorbringt, ſo macht ſich auch ſogleich die Schwere der einzelnen Waſſertheilchen geltend, um die geſtörte horizontale Ebene wieder herzuſtellen. Laſſen wir z. B. einen Stein in's Waſſer fallen, ſo bilden ſich rings um die getroffene Stelle abwechſelnd kreisförmige Erhabenheiten und Vertiefungen, d. h. Wellen, welche nach allen Richtungen gleichförmig fortſchreiten. Daß hierbei den einzelnen Waſſertheilchen keine eigentlich fortſchreitende Bewegung zukommt, ſieht man ſchon, wenn die Welle einem im Waſſer ſchwimmenden Körper begegnet. Dieſer hebt und ſenkt ſich um die eigene Höhe und Tiefe der Welle, ohne daß ihm eine fortſchreitende Bewegung mitgetheilt wird.

Jede vollſtändige Welle beſteht aus zwei Haupttheilen, von denen der eine über der gewöhnlichen Oberfläche des Waſſers erhaben, der andere aber unter dieſelbe vertieft iſt. Den erſteren nennt man Wellenberg, den zweiten Wellenthal. Stellt abcde den Durchſchnitt einer Welle dar, die in der Richtung ae fortſchreitet, ae ſelbſt aber die Horizontale; ſo iſt abc der Durchſchnitt des Wellenberges, cde der des Wellenthales. Ferner nennt man ab den Hinter-, bc den Vordertheil des Berges, und ebenſo cd den Hinter- und de den Vordertheil des Thales. Die Entfernung bf des Gipfels des Wellenberges von der Horizontalen iſt gleich der Höhe des Berges, während die Entfernung dg des tiefſten Punktes des Wellenthales von derſelben Horizontalen gleich der Tiefe des Thales iſt. Die Länge der Welle iſt ae.



Um den Zuſammenhang zwiſchen der Bewegung der einzelnen Theilchen und dem Fortſchreiten der Welle genauer zu erforſchen, gebrauchten die Brüder Weber ein langes, ſchmales, aber hinreichend tiefes Gefäß, welches ſie Wellenrinne nannten. Die ſenkrechten Wände derſelben beſtehen aus Glasplatten, welche in den hölzernen Boden waſſerdicht eingeſetzt ſind. Außer dieſer Wellenrinne bedienten ſie ſich

Digitized by Google

bei ihren ausgezeichneten Untersuchungen über die Wellenbewegung noch einer größeren, deren Wände aus Brettern bestanden, in denen aber an manchen Stellen Glasscheiben wasserdicht eingesetzt waren, um die Flüssigkeit beobachten zu können.

Füllt man nun die kleinere Wellenrinne mit irgend einer tropfbaren Flüssigkeit, z. B. mit Wasser oder Quecksilber, und veranlaßt darin eine regelmäßige Welle, so kann man durch die Glaswände hindurch den senkrechten Durchschnitt dieser Welle sehen. Schweben zugleich im Innern der Flüssigkeit feine, feste Theilchen, welche mit ihr gleiches specif. Gewicht haben, so läßt sich aus der Bewegung derselben auf die der Flüssigkeitstheilchen schließen.

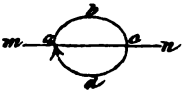
Man kann auch die Gestalt der Welle bleibend sichtbar machen, wenn man dieselbe auf einer mit Mehl bestaubten Schiefertafel sich abbilden läßt.

Um mehrere Wellen von derselben Beschaffenheit zu erregen, gebrauchten die beiden Weber zweckmäßig eine Glasröhre. Man taucht nämlich dieselbe mit einem Ende in die Flüssigkeit, während man am anderen durch Saugen mit dem Munde eine Flüssigkeitssäule in die Höhe hebt und dann wieder fallen läßt. Die auf diese Weise erregten Wellen werden stets gleich groß, sofern die gehobene Säule gleich groß war.

Füllt man die Wellenrinne mit verschieden gefärbten Flüssigkeiten von ungleichem specifischem Gewichte und erregt dann eine Welle, so gewahrt man, wie die verschiedenen, parallel unter einander liegenden, horizontalen Schichten gleichzeitig von Wellen durchlaufen werden.

Auf diesem Wege gelangten die Brüder Weber zu einer Menge der interessantesten Resultate, von denen wir die wichtigsten mittheilen wollen. Das Nähere findet sich in ihrem bekannten Werke: die Wellenlehre auf Experimente gegründet, Leipzig 1825.

124. Während sich eine Welle regelmäßig ausbreitet, beschreiben die einzelnen Wassertheilchen krumme in sich zurückkehrende Bahnen, welche in einer verticalen Ebene liegen. Diese Bahnen sind anscheinend Ellipsen, welche sich der Kreisform nähern. Sei abcd die Bahn eines Theilchens und bezeichne mn die horizontale Oberfläche des Wassers. Beschreibt nun das Theilchen den über mn liegenden Bogen abc, so bildet es einen Theil des Wellenberges; durchläuft es aber den unterhalb mn liegenden Bogen cda, so gehört es zum Wellenthale. Indem die einzelnen Wassertheilchen, welche in der Richtung der Wellenfortpflanzung lie-



Digitized by Google

gen, succeſſiv in dieſe ſchwingende Bewegung gerathen, ſchreitet die Welle ſelbſt fort, und zwar in der Art, daß ſie um eine ganze Wellenlänge weiter kommt, während ein Theilchen eine vollſtändige Schwingung vollendet. Jedes ſchwingende Theilchen wiederholt ſeine Umdrehung mehrmals und zwar in immer kleineren Bahnen und in immer kürzerer Zeit. Wie viele Umläufe es macht, ſo viele Wellen gehen auch an dem Orte, wo es ſich bewegt, vorüber. Da die in der Richtung der Wellenfortpflanzung liegenden Theilchen succeſſiv in dieſe ſchwingende Bewegung gerathen, ſo können auch nie mehrere derſelben gleichzeitig, ſondern nur succeſſiv in entſprechende Punkte ihrer Schwingungsbahnen gelangen. Die Entfernung von einem Theilchen bis zum nächſten, welches ſich mit ihm in gleichem Schwingungszuſtande befindet, iſt gleich einer Wellenlänge. Denn nach dem Obigen ſchreitet die Wellenbewegung um eine Wellenlänge weiter, während ein Theilchen eine vollſtändige Oscillation vollendet. Beginnt nun dieſes Theilchen wiederum eine Oscillation, ſo geräth auch zugleich jenes um eine Wellenlänge entfernte Theilchen in Schwingung, dergeſtalt, daß beide gleichzeitig ihren tiefſten und ihren höchſten Stand erreichen. Hiernach iſt auch die Entfernung vom Gipfel eines Wellenberges bis zum nächſten oder die Entfernung von der Mitte eines Wellenthales bis zur Mitte des nächſten Thales eine Wellenlänge. Dagegen befinden ſich Theilchen, welche um ½ Wellenlänge von einander entfernt ſind, immer in entgegengeſetzten Schwingungszuſtänden, ſo z. B. die beiden Theilchen, von denen eines die Mitte eines Wellenthales, das andere aber den Gipfel des nächſten Wellenberges bildet. Während das erſte den tiefſten Punkt ſeiner Bahn einnimmt, befindet ſich das andere im höchſten Punkte ſeiner Schwingungsbahn.

Man ſieht nun klar, daß die Schwingung der Theilchen die eigentliche Bewegung beim Fortſchreiten der Welle iſt, während die letztere ſelbſt nur die Form iſt, welche die Flüſſigkeit an ihrer Oberfläche in Folge jener ſchwingenden Bewegung der einzelnen Theilchen annehmen muß.

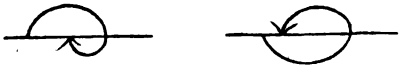
Es ſeien in beigefügter Figur a, b, c, d, e, f, g ... mehrere

in der Richtung der Wellenfortpflanzung liegende Theilchen mit ihren kreisförmigen Bahnen. Die Wellenbewegung geſchehe von der linken

Digitized by Google

nach der rechten Seite hin. Man betrachte nun jedes Theilchen in dem Moment, wo das erste a seine Bahn vollendet hat und wieder seine anfängliche Lage einnimmt, während das Theilchen g eben seine Bewegung beginnt. Dann ist momentan b in b', c in c', d in d', e in e' und f in f', wodurch die Flüssigkeit die Form der Curve ab' c' d' e' f' g gewinnt. —

Uebrigens sind die Bahnen der an der Oberfläche liegenden Theilchen nur dann Kreise oder vielmehr Ellipsen, wenn die zusammengehörigen Wellenberge oder Wellenthäler gleich gestaltet sind, sonst werden Curven beschrieben, die nicht in sich zurückkehren, wie nebenstehende Figur zeigt.



125. Mit der Tiefe der Flüssigkeit werden die elliptischen Bahnen immer gedehnter, so daß sie endlich mit einer geraden Linie zusammenfallen, in der die Theilchen hin und her schwingen. Auch nimmt mit zunehmender Tiefe sowohl der verticale als auch der horizontale Durchmesser der Bahn an Größe ab, jedoch der verticale schneller als der horizontale, was mit dem kurz zuvor Angeführten in Verbindung steht. Es scheint dies den Versuchen zufolge eine Wirkung des Bodens zu sein.

Während die in der Richtung der Wellenfortpflanzung liegenden Theilchen successiv in schwingende Bewegung gerathen, beginnen die in verticaler Richtung übereinander liegenden Theilchen ihre Bewegung gleichzeitig. Dabei durchlaufen die in der Nähe der Oberfläche gelegenen ihre Bahnen nicht so schnell als die vertical oder beinahe vertical unter ihnen befindlichen Theilchen, welche von der Oberfläche entfernter sind.

Der senkrechte Durchmesser der krummen Bahn, welchen die an der Oberfläche liegenden Theilchen beschreiben, ist gleich der Höhe der ganzen Welle, während der horizontale Durchmesser der Bahn in keinem bestimmten Verhältnisse zur Breite der Welle steht. Die Zeit nun, in welcher ein Flüssigkeitstheilchen seine Bahn vollendet, hängt ganz allgemein von dem Verhältnisse der Länge und Breite jeder Welle ab. So durchlaufen bei gleich breiten, aber ungleich hohen Wellen die Theilchen in der höheren Welle ihre Bahn schneller als die in der niedrigeren, und umgekehrt wird bei gleich hohen aber ungleich breiten Wellen in der schmäleren Welle die Bahn schneller vollendet als in der breiteren.

126. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Welle selbst in tropfbaren Flüssigkeiten fortpflanzt, hängt von ihrer Höhe und Breite ab oder, was dasselbe ist, von ihrer Breite und der Geschwin-

Digitized by Google

digkeit, womit die Flüssigkeitstheilchen ihre Schwingungsbahnen durchlaufen, da nach dem Obigen diese Geschwindigkeit selbst von der Höhe der Welle abhängig ist. Nun wird aber die Höhe und Breite der Welle bestimmt durch die wellenerregende Kraft; je größer diese ist, desto größer auch die Welle; folglich hängt die Geschwindigkeit der Welle selbst unter sonst gleichen Umständen auch von der Masse und Geschwindigkeit des Körpers ab, dessen Stoß die Welle erregt. So wird die Geschwindigkeit der Wellen vermindert, wenn sie während ihrer Ausbreitung an Länge zu-, also an Höhe abnehmen, wie z. B. die Kreiswellen, welche ein in einen Teich geworfener Stein veranlaßt. Dagegen wird die Geschwindigkeit der Wellen vermehrt, wenn sie an Länge ab-, an Höhe aber zunehmen, wie die Kreiswellen, welche vom Rande einer runden mit Wasser gefüllten Schüssel bei Erschütterung derselben nach der Mitte hin gehen. Hieraus folgt dann weiter, daß Wellen, die fortwährend an Höhe ab-, an Breite aber zunehmen, immer mit gleicher Geschwindigkeit fortgehen müssen. Mit Verminderung der Tiefe der Flüssigkeit nimmt die Geschwindigkeit der Wellen ab. Dies hängt theils davon ab, daß die größere Nähe des Bodens die elliptische Schwingungsbahn der Theilchen abändert, theils von einem Einflusse der Reibung u. dgl. Eine Aenderung des specifischen Gewichtes der Flüssigkeit scheint keine Aenderung in der Geschwindigkeit der Wellen mit sich zu führen, in sofern nur die Flüssigkeit eine hinreichende Tiefe hat, so daß der Boden keinen merklichen Einfluß auf die Flüssigkeit haben kann. Doch kommt hierbei auch noch die verschiedene Adhäsion verschiedener Flüssigkeiten an die Wände, so wie der Luftwiderstand in Betracht.

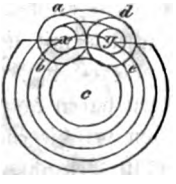
127. Wenn man in der Wellenrinne an den entgegengesetzten Enden zwei gleich große Wellen erregt, so müssen sich diese in der Mitte begegnen und in allen Theilen durchkreuzen. Hier entsteht aus zwei Wellenbergen ein einziger, dessen Höhe fast der Summe beider gleich ist, so wie aus zwei sich durchkreuzenden Thälern ein einziges, das beinahe die doppelte Tiefe eines einzelnen hat. Während der Durchkreuzung wird die Bewegung der einzelnen Flüssigkeitstheilchen abgeändert, indem die elliptische Bahn in eine geradlinige, verticale übergeht, und zwar geht bei der Durchkreuzung zweier Wellenberge die Bewegung vertical aufwärts, bei der zweier Wellenthäler aber vertical abwärts. Die verticale Richtung ist hier die einzige, nach welcher ein Ausweichen der Flüssigkeitstheilchen stattfinden kann. Die Durchkreuzung führt eine kleine Verzögerung in dem Fortschreiten der Wellen mit sich, doch bewegen sich nachher die

Digitized by Google

Wellen mit ihrer früheren Geschwindigkeit fort, so als ob sie sich nicht durchkreuzt hätten.

Wenn eine Welle gegen eine feste Wand anstößt, so wird sie zurückgeworfen, indem sie in entgegengesetzter Richtung nach dem Orte zurückkehrt, von welchem sie ausgegangen war. Der Winkel, unter welchem ein Theil der Welle an die Wand anstößt, ist gleich dem Winkel, unter dem er wieder zurückgeht. Während der Zurückwerfung werden die beiden Theile der Welle, nämlich Wellenberg und Wellenthal, in ihrer Lage umgekehrt, so daß beide durch einander hindurchgehen. Auch erleiden die Bahnen der einzelnen Theilchen dieselbe Abänderung wie bei der Durchkreuzung zweier Wellen, indem ihre verticale Bewegung immer mehr verstärkt, ihre horizontale aber gleichzeitig immer mehr beeinträchtigt wird. Im Moment der Zurückwerfung wird der Wellenberg halb so breit, aber beinahe noch einmal so hoch als vorher, was auch von der Breite und Tiefe eines Wellenthales gilt. Da wo Wellenberg und Wellenthal durch einander hindurchgehen, wird die Oberfläche der Flüssigkeit vollkommen eben.

Wenn in einer tropfbaren Flüssigkeit eine Welle, deren Mittelpunkt c sein mag, an eine senkrechte Wand mit einer Oeffnung xy stößt, so findet dasjenige statt, was man Beugung der Welle nennt. Die Endstücke der Wellenbogen nämlich, welche nach einander durch die Oeffnung xy gehen, werden an den Rändern derselben gegen die Wände hin zu Kreisbogen ab, de, u. s. w., umgebeugt, deren Mittelpunkte x und y sind. Man sieht, daß durch diese Bogen stets eine Verbindung zwischen den Theilen der Welle vor und hinter der Oeffnung stattfindet. Diese durch Inflexion entstandenen kreisförmigen Wellen durchkreuzen sich während ihrer Ausbreitung, wodurch sie sich an einigen Stellen verstärken, an anderen aber schwächen oder unter Umständen ganz aufheben.



128. Von den fortschreitenden Schwingungen, welche der bisher betrachteten gewöhnlichen Wellenbewegung zu Grunde liegen, sind die stehenden Schwingungen tropfbarer Flüssigkeiten zu unterscheiden. Bei den letzteren findet kein Fortschreiten der Wellenform statt, sondern die Wellenberge verwandeln sich durch verticales Niedersinken an demselben Orte abwechselnd in Thäler, die Thäler aber durch verticales Steigen in Berge. Doch bilden sich diese Schwingungen gewöhnlich aus dem Zusammentreffen direct fortschreitender und zurück-

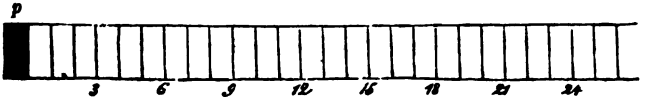
Digitized by Google

geworfen fortschreitender Wellen. Man kann die Entstehung dieser Art von Wellen leicht dem Auge sichtbar machen, wenn man in einem langen, schmalen, mit Wasser angefüllten Glaskasten in regelmäßigen Zeitabschnitten gleich breite Wellen erregt. Wir werden auf die stehenden Schwingungen bei der Wellenbewegung in der Luft wieder zurückkommen.

129. Ein in seinen Theilen vibrirender Körper veranlaßt auch in der umgebenden Luft eine Wellenbewegung, welche in unserem Ohre, sofern sie dahin gelangt, einen Schall hervorbringt. Obgleich die Luft das gewöhnliche Medium des Schalles ist, so sind doch auch alle anderen elastischen Körper, sie mögen fest, tropfbarflüssig oder gasförmig sein, fähig, den Schall fortzupflanzen, wie dies die Erfahrung zur Genüge nachweiset. Daß feste Körper den Schall nicht allein erzeugen, sondern auch fortpflanzen können, erkennt man schon daraus, daß, wenn man das Ohr an das eine Ende eines langen Balkens bringt, man deutlich hört, wenn am anderen Ende schwach angeklopft wird, obgleich dieses Geräusch in der Luft nicht gehört werden kann. Eben so pflanzt sich auch der Schall sehr gut durch das Wasser fort. Denn die Taucher hören das, was am Ufer gesprochen wird, so wie man es am Ufer deutlich hört, wenn in der Tiefe Steine an einander geschlagen werden. Macht man einen großen Ballon, in welchem ein Glöckchen aufgehängt ist, luftleer, so hört man dieses nicht mehr; dagegen wird es wieder hörbar, wenn man den Ballon mit dem Dampfe einer flüchtigen Flüssigkeit anfüllt. Aus diesem Versuche folgt also, daß der Schall sich durch Dämpfe und Gase verbreitet, aber auch, daß er sich nicht durch den leeren Raum fortpflanzen kann.

Um die Fortpflanzung der Wellenbewegung in der Luft genauer darzustellen, wollen wir annehmen, daß die Luft in einer an einem Ende offenen Röhre durch die Oscillation eines am anderen Ende angebrachten Kolbens in Schwingungen versetzt werde.

Fig. 1.



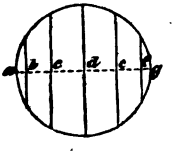


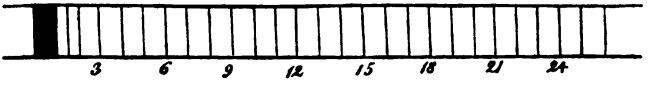
Fig. 1 bezeichne die mit Luft von gleichförmiger Dichte angefüllte Röhre; p sei der Kolben und durch die Striche sei die Luft in gleiche Schichten getheilt. Der Kolben bewege sich um die Länge ag in nebenstehender Figur rasch hin

Digitized by Google

und her. Diese Bewegung kann, wie man leicht sieht, nicht gleichförmig sein. Denkt man sich die Zeit, welche der Kolben zu einem Hin- und Hergange, nämlich von a nach g und von g nach a zurück braucht, in 12 gleiche Theile getheilt, so wird er im ersten Zeittheilchen den Weg ab, im zweiten den Weg bc, im dritten den Weg cd, u. s. w. zurücklegen. Die Bewegung nimmt also anfänglich fortwährend an Geschwindigkeit zu, so daß sie am Ende des dritten Zeittheilchens am größten ist; hierauf nimmt sie allmälig wieder ab und wird 0 am Ende des sechsten Zeittheils, wo der Kolben das Ende seiner Bahn erreicht hat und sich rückwärts zu bewegen anfängt. Die Punkte b, c, d, e erhält man leicht, wenn man um die Schwingungsweite ag des Kolbens einen Kreis zieht, dessen Umfang in 12 gleiche Theile theilt und von den Theilungspunkten Perpendikel auf ag fällt.

Die Bewegung des Kolbens muß sich nun allmälig auf die einzelnen Luftschichten fortpflanzen, indem die dem Kolben zunächst liegenden Schichten zuerst comprimirt werden, welche dann wegen ihrer Elasticität auf die folgenden wirken. So macht jede Schicht nach einiger Zeit dieselben Schwingungen wie der Kolben, aber natürlich um so später, je weiter sie von ihm entfernt ist.

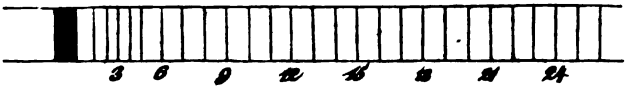
Fig. 2.



In dem Augenblicke, wo der Kolben die Hälfte seines Weges zurückgelegt hat, wo er also um ad von seiner anfänglichen Lage entfernt ist, wird sich die Bewegung bis zur Luftschicht 3 fortgepflanzt haben. Die letztere ist momentan noch in ihrer ursprünglichen Lage, während die Luft zwischen dem Kolben und 3 comprimirt ist, wodurch nun auch die Luftschicht 3 zur Bewegung veranlaßt wird. Natürlich haben auch die Luftschichten 1 und 2 ihre Bewegung später als der Kolben begonnen und können also auch noch nicht so weit als dieser von ihrer anfänglichen Lage entfernt sein. Nun begann die Luftschicht 1 ihre Bewegung um $^1/_{12}$, die Schicht 2 um $^2/_{12}$ der Zeit, welche der Kolben zu einem Hin- und Hergange nöthig hat, später als dieser, so daß also 1 um die Entfernung ac, 2 nur um das Stück ab von der ursprünglichen Lage nach der Rechten hin entfernt ist, während die Luftschicht 3 ihre Bewegung eben beginnt. Hat der Kolben, wie in Fig. 3, das rechte Ende seiner Bahn erreicht, ist er also um ag von seiner ursprünglichen Lage entfernt, so

Digitized by Google

Fig. 3.



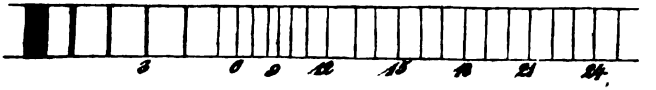
hat sich unterdessen die Bewegung bis zur Luftschicht 6 fortgepflanzt, welche gerade ihre Bewegung beginnt. In dem Augenblicke, wo die rückgängige Bewegung des Kolbens ihren Anfang nimmt, hat die Luftschicht 3 in ihrer Bewegung von der Linken zur Rechten die größte Geschwindigkeit erlangt. Es ist also nunmehr

die Luftschicht 1 um das Stück af
" " 2 " " " ae
" " 3 " " " ad
" " 4 " " " ac
" " 5 " " " ab
" " 6 " " " 0

von ihrer anfänglichen Lage in Fig. 1 entfernt. Hieraus folgt die gegenseitige Lage der Luftschichten in Fig. 3, in der man bei 3 die stärkste Verdichtung der Luft bemerkt.

Kehrt jetzt der Kolben in seine ursprüngliche Lage zurück, so pflanzt sich inzwischen die Bewegung bis zur Luftschicht 12 fort, während die Schichten zwischen dem Kolben und 6 eine rückgängige Bewegung annehmen. In dem Moment also, wo der Kolben und die

Fig. 4.



Luftschicht 12 in ihrer anfänglichen Lage momentan in Ruhe sind, sind alle zwischenliegenden Luftschichten von ihrer ursprünglichen Lage entfernt, indem alle Luftschichten zwischen dem Kolben und 6 eine rückgängige Bewegung von der Rechten zur Linken, dagegen alle zwischen 6 und 12 eine fortschreitende nach der Rechten hin haben. Demnach ist

die Luftschicht 1 um die Länge ab
" " 2 " " " ac
" " 3 " " " ad
" " 4 " " " ae
" " 5 " " " af
" " 6 " " " ag
" " 7 " " " af
" " 8 " " " ae
" " 9 " " " ad

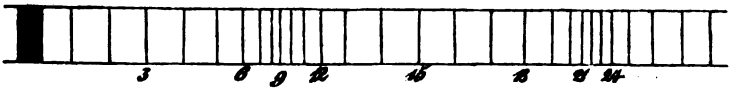
Digitized by Google

die Luftschicht 10 um die Länge ac
" " 11 " " " ab
" " 12 " " " 0

von der anfänglichen Lage entfernt. Bei 3 findet sich also die stärkste Verdünnung und bei 9 die stärkste Verdichtung der Luft. Auch hat 3 die größte Geschwindigkeit nach der Linken, während sich 9 mit der größten Geschwindigkeit nach der Rechten hin bewegt.

Bleibt jetzt der Kolben in Ruhe, so wird zuerst die Luftschicht 1 und dann jede der folgenden in ihre ursprüngliche Lage zurückkehren, um nunmehr in Ruhe zu bleiben, während sich noch die Bewegung nach der Rechten hin fortpflanzt. Ist z. B. die Luftschicht 3 in ihre anfängliche Lage zurückgekommen, so wird sich die Bewegung bis 15 fortgepflanzt haben, während sich das Maximum der Verdünnung bei 6 befindet. In dem Moment aber, wo 12 in seine ursprüngliche Lage zurückgekehrt ist, hat sich das Maximum der Verdünnung bis 15, das Maximum der Verdichtung bis 21 fortgepflanzt, während die Luftschicht 24 eben ihre Bewegung nach der Rechten hin beginnt.

Fig. 5.



Die Länge einer Welle ist die Entfernung zweier Theilchen, welche sich stets in gleichen Schwingungszuständen befinden. So beginnen der Kolben und die Luftschicht 12 ihre Bewegung gleichzeitig nach der Rechten hin, beide vollenden ihre Bahn in gleichen Zeiten auf dieselbe Weise, was auch von der Luftschicht 12 und 24 gilt. Darum liegt zwischen dem Kolben und der Luftschicht 12 eine Welle, wie auch zwischen 12 und 24 eine solche. Jede Welle besteht aus einem verdichteten und einem verdünnten Theile, von denen der erste dem Wellenberg und der zweite dem Wellenthale einer Wasserwelle entspricht. Man sieht aber auch, daß die Entfernung von einem Dichtigkeitsmaximum zum anderen, z. B. von 9 bis 21, und eben so die Entfernung von einem Maximum der Verdünnung zum nächsten, nämlich von 3 bis 15, gleich einer Wellenlänge ist.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen selbst ist unabhängig von der Oscillationsgeschwindigkeit der Lufttheilchen, oder, was dasselbe ist, von der Zeit, welche ein Theilchen braucht, um eine Schwingung zu vollenden. Nun ist aber die Wellenlänge die Entfernung, um welche die Welle fortschreitet, während eine einzelne

Digitized by Google

Luftschicht eine vollständige Schwingung vollendet. Die Wellenlänge muß also in demselben Verhältnisse zunehmen, in welchem die Schwingungsdauer der einzelnen Lufttheilchen wächst. Wenn also der Kolben und auch die einzelnen Luftschichten zu einer vollständigen Oscillation eine doppelte, dreifache Zeit brauchen, so wird auch die Wellenlänge zwei-, dreimal so groß werden. Dagegen liegen bei doppelter Oscillationsgeschwindigkeit zwischen denselben Grenzen auch zweimal so viel Wellen als bei der einfachen. So hatte sich in unserem obigen Falle, Fig. 5, die Wellenbewegung nach zwei Oscillationen des Kolbens bis zur Schicht 24 fortgepflanzt, wodurch zwei Wellen (vom Kolben bis 12 und von 12 bis 24) entstanden waren. Vollbringt nun der Kolben in derselben Zeit nur eine Oscillation, so pflanzt sich doch in dieser Zeit die Bewegung eben so weit wie im vorigen Falle fort, aber es entsteht zwischen dem Kolben und 24 nur eine Welle.

Wie in einer cylindrischen Luftsäule, so pflanzt sich auch in der freien Luft die vibrirende Bewegung eines Körpers nach allen Seiten hin fort, so daß sich kugelförmige Luftwellen um den Körper bilden. Jede einzelne Welle besteht aus zwei concentrischen Theilen; in dem einen ist die Luft verdichtet, in dem anderen aber verdünnt. Die schwingende Bewegung der Lufttheilchen geschieht in jeder Welle nach der Richtung des Halbmessers, indem jede Seitenbewegung durch den Widerstand der im gleichen Zustande der Verdichtung oder Verdünnung befindlichen Theilchen verhindert wird.

Auf ähnliche Weise wie in einer Luftsäule pflanzt sich auch die Wellenbewegung im longitudinalen Sinne durch einen cylindrischen oder prismatischen Stab aus einem nach allen Richtungen gleich elastischen Stoffe oder in einer Säule tropfbarer Flüssigkeit fort.

130. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich irgend eine Erschütterung in der Luft fortpflanzt, ist gleichförmig und hängt lediglich von dem Verhältnisse der Spannkraft zur Dichtigkeit der Luft ab. Analytischen Untersuchungen zufolge ist das Quadrat der Geschwindigkeit der Spannkraft direct und der Dichtigkeit umgekehrt proportional, so daß man die Formel hat: $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$, wenn durch c die Geschwindigkeit, durch e die Spannkraft und durch d die Dichte der Luft bezeichnet wird. Da sich der Druck oder die Spannkraft der Luft durch das Gewicht einer Quecksilbersäule messen läßt, so kann man diese Formel auch durch $c = \sqrt{\frac{g\,h}{d}}$ ausdrücken, wo nämlich g die Beschleunigung der

Digitized by Google

Schwere und h die Höhe der Queckſilberſäule iſt, welche die Spannkraft der Luft bei 0° C. mißt. So lange die Temperatur dieſelbe bleibt, ändert ſich die Geſchwindigkeit nicht, wie ſich auch der Barometerſtand oder der Druck der Luft ändern mag. Denn dem Mariotte'ſchen Geſetze zufolge ändert ſich die Spannkraft eines Gaſes der Dichtigkeit proportional ab, ſo daß bei conſtanter Temperatur das Verhältniß zwiſchen beiden daſſelbe bleibt. Mithin erleidet auch die Geſchwindigkeit obiger Formel gemäß keine Aenderung. Hieraus folgt aber auch weiter, daß die Wärme großen Einfluß auf die Geſchwindigkeit des Schalles haben muß, inſofern ſie nämlich jenes Verhältniß zwiſchen der Spannkraft und Dichte der Luft abändert. Wir wollen annehmen, daß ſich bei conſtanter Spannkraft die Dichte der Luft ändere, indem die Temperatur von 0° C., wofür e und d in obiger Formel ihre Geltung haben, auf t ſteigt. Sei für dieſe Temperatur d' die Dichte der Luft und c' die Schallgeſchwindigkeit. Alsdann hat man ſtatt der obigen Formel dieſe: $c' = \sqrt{\frac{e}{d'}}$. Betrachten wir das Volumen der Luft bei 0° als Einheit, ſo wird es bei t° gleich $1 + \alpha t$, wenn $\alpha = 0{,}00365$ der Ausdehnungscoefficient der Luft für eine Temperaturerhöhung von 1° iſt. Nach dem Mariotte'ſchen Geſetze verhalten ſich aber die Dichtigkeiten umgekehrt wie die Volumina, alſo $d : d' = 1 + \alpha t : 1$ oder $d' = \frac{d}{1 + \alpha t}$. Folglich durch Subſtituirung dieſes Werthes

$$c' = \sqrt{\frac{e}{d}(1 + \alpha t)} = c\sqrt{1 + \alpha t},$$

wenn man die zuerſt aufgeſtellte Formel berückſichtigt.

Um die Fortpflanzungsgeſchwindigkeit des Schalles in der Luft durch Verſuche zu ermitteln, bedient man ſich des gleichzeitigen Abfeuerns zweier Kanonen an zwei Orten, deren Entfernung genau gemeſſen wird. An einem jeden dieſer Orte befinden ſich Beobachter, welche vermittelſt des Chronometers die Zeit vom Augenblicke der Lichterſcheinung bis zur Ankunft des Schalles meſſen. Das Mittel aus dieſen Beobachtungen giebt die Zeit, welche der Schall braucht, um von einer Station zur anderen zu gelangen. Dabei hat man auch auf die Wärme und Feuchtigkeit der Luft Rückſicht zu nehmen. Dividirt man nun die Entfernung beider Standorte durch jene Zeit, ſo erhält man den Weg, welchen der Schall in 1 Secunde zurücklegt. Auf dieſe Weiſe ergab ſich für die Fortpflanzungsgeſchwindigkeit des Schalles in 1 Secunde 1050'. Auch fand man, daß

Digitized by Google

der Wind den Schall um seine eigene Geschwindigkeit beschleunigt, sofern er mit ihm geht, im umgekehrten Falle aber um eben so viel verzögert. In feuchter Luft bewegt sich der Schall schneller als in trockener.

131. Die theoretisch berechnete Geschwindigkeit des Schalles weicht von der durch Versuche gefundenen um ein Bedeutendes ab, da sie beinahe um $^1/_6$ zu klein ist. Laplace hat diesen Unterschied mit Evidenz aus der Wärmeveränderung abgeleitet, welche mit den abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luft bei der Fortpflanzung des Schalles verbunden ist. Bei der Verdichtung erwärmt sich nämlich die Luft, wodurch sie eine größere Spannkraft erlangt, während sie bei der Verdünnung Wärme bindet oder kälter wird, also an Spannkraft verliert. Hieraus folgt eine Beschleunigung der Geschwindigkeit, weil nämlich der Unterschied der Spannkraft der verdichteten oder verdünnten Luft gegen die Spannkraft der in ihrer gewöhnlichen Dichte befindlichen Luft durch jene Erwärmung und Erkältung vergrößert wird. Dies läßt sich auch auf die Verbreitung des Schalles im Wasserdampfe anwenden, der sich im Maximum der Dichtigkeit befindet. Wir haben schon erwähnt, daß sich der Schall in Dämpfen eben sowohl erzeugt und fortpflanzt als in der Luft. Denken wir uns nun einen tönenden Körper in einem mit Dampf angefüllten geschlossenen Gefäße. Während die den Körper berührende Dampfschicht durch seine Vibrationen verdichtet wird, erhöht sich ihre Temperatur und Spannkraft, wodurch es ihr möglich gemacht wird, in der Dampfform zu beharren. Im Gegentheile würde sie sich in Wasser verwandeln und auf den Körper niederschlagen, da sie in Beziehung auf die Temperatur des Raumes, worin sie sich befindet, im Maximum der Dichtigkeit ist. Indem die zuerst verdichtete Dampfschicht die folgende verdichtet, u. s. w., pflanzt sich der Schall, wie in der Luft, zu den Wänden des Gefäßes fort. Dagegen sind die Verdünnungen der Dampfschichten, welche auf die Verdichtungen folgen, mit einer Wärmeabnahme verbunden. Da aber mit dieser zugleich die Dichte abnimmt und die Spannkraft unter das Maximum, welches sich auf die anfängliche Temperatur des von den Gefäßwänden begrenzten Raumes bezieht, herabsinkt, so wird wieder die Verwandlung des Dampfes in Wasser, welche sonst stattfinden würde, verhindert.

Laplace giebt für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in Gasen und Dämpfen die Formel $c = \sqrt{\frac{g\,h}{d}k}$, in welcher g,

Digitized by Google

h, d die schon früher angegebene Bedeutung haben und k das Verhältniß der specifischen Wärme des Gases bei constantem Drucke zu der specif. Wärme bei constantem Volumen bezeichnet, ein Verhältniß, welches wir in der Lehre von der Wärme werden näher kennen lernen. Diese Formel läßt sich leicht zur Berechnung der Geschwindigkeit des Schalles in der atmosphärischen Luft einrichten. Es ist nämlich trockene Luft bei einem Barometerstande von 0,76 Mtr. und 0° C. Temperatur 10466,82 Mal leichter als Quecksilber. Demnach ist bei einem Drucke h und einer Temperatur t mit Berücksichtigung des Mariotte'schen Gesetzes die Dichtigkeit der Luft

$$d = \frac{h}{0{,}76 \,.\, 10466{,}82 \,(1 + \alpha\, t)}.$$

Wird dieser Werth in obige Formel substituirt und für k sein Zahlwerth 2,3748 eingeführt, so erhält man nach einer leichten Reduction

$$c = 327{,}52 \sqrt{1 + \alpha\, t}$$

für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft.

132. Die zu Anfange des §. 130 aufgestellte Formel $c = \sqrt{\frac{e}{d}}$ läßt sich auch zur Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer longitudinalen Wellenbewegung an einer gespannten Saite, in einem prismatischen oder cylindrischen Stabe und in einer Säule tropfbarer Flüssigkeit benutzen.

Denken wir uns zu diesem Ende, daß der Druck e, unter welchem eine Luftsäule von der Höhe 1 in einer cylindrischen Röhre steht, um ihr eigenes Gewicht vermehrt werde. Da die Luft nur nach der Länge ausweichen kann, so muß sich die Säule um eine bestimmte Größe $= \lambda$ verkürzen. Ist nun die Grundfläche der Säule ebenfalls $= 1$, so ist bekanntlich ihr Gewicht gd, wo g wieder die Beschleunigung der Schwere bezeichnet, und wie aus der Natur der Sache erhellet, $e : e + gd = 1 - \lambda : 1$ oder $e : gd = 1 - \lambda : \lambda$, also $\frac{e}{d} = \frac{g\,(1-\lambda)}{\lambda}$ und $c = \sqrt{\frac{g\,(1-\lambda)}{\lambda}}$ oder, wenn man im Zähler λ wegen seiner Kleinheit in Beziehung auf 1 vernachlässiget, $c = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$.

Diese Formel dient nun auch zur Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer longitudinalen Wellenbewegung in einem festen Stabe oder einer Wassersäule, wenn man ermittelt, um wie viel sich ein Stab oder eine tropfbare Flüssigkeitssäule von der Länge 1 verkürzt oder verlängert, falls man dieselben durch ein Gewicht, welches

Digitized by Google

dem ihrigen gleich ist, zusammendrückt oder ausdehnt. Man sieht aus der Formel, daß die Geschwindigkeit des Schalles in festen und tropfbarflüssigen Körpern größer ist als in gasförmigen; denn je geringer der Nenner jenes Bruches, desto größer c. So ist im Zinn die Geschwindigkeit des Schalles $7^1/_2$, im Messing $10^2/_3$, im Kupfer 12, im Eisen und Stahl $16^2/_3$, im Tannenholze 18 Mal größer als in der Luft.

Wir werden später sehen, daß sich auch die tropfbaren Flüssigkeiten, wenngleich in geringem Maße, zusammendrücken lassen. So wird eine Wassersäule von 1 Mtr. Länge in einer unelastischen Röhre durch den Druck einer Atmosphäre um 0,00004785 Mtr. comprimirt. Da nun der Druck der Atmosphäre gleich einem Queckfilberdrucke von 0,76 Mtr. oder einem Wasserdrucke von 10,2934 Mtr. bei einer Temperatur von 10° ist, so folgt hieraus, daß eine Wassersäule von 1 Meter Höhe durch das Gewicht einer eben solchen Säule um $\frac{0{,}00004785}{10{,}2934} = 0{,}0000046486$ Mtr. verkürzt wird. Substituirt man diese Zahl für λ in obige Formel und setzt auch statt g seinen Zahlwerth, so ist $c = \sqrt{\frac{9{,}8088}{0{,}0000046486}} = 1453$ Meter für 1 Secunde die Geschwindigkeit des Schalles im Wasser von 10°.

133. Wir wissen schon, daß durch Störung des Gleichgewichtes gewisser Theile eines Mediums eine nach allen Seiten sich ausbreitende Welle entsteht. Hat sich aber einmal eine regelmäßige Wellenbewegung gebildet, so schreitet jede Elementarwelle nur im Sinne der Fortpflanzung der Wellenbewegung überhaupt fort, nicht aber im entgegengesetzten Sinne. Denn die schwingenden Theilchen stoßen nach der Richtung der Fortpflanzung der Welle auf ruhende Theilchen, welche sie zur Bewegung veranlassen, nach der entgegengesetzten Richtung aber auf bewegte Theilchen, die sie zur Ruhe bringen. Man denke sich a, b, c, d, e, f, g, h als successive Lufttheilchen in einer Röhre, und zwar in dem Grade der Dichtigkeit, welcher ihrem Ruhezustande entspricht. Erhalten nun die Theilchen d, e eine doppelt so große Dichtigkeit als die anderen oder werden sie, was dasselbe ist, einander doppelt so nahe gebracht, so müssen sie sich nothwendiger Weise in Folge ihrer Spannkraft, welche mit der Dichtigkeit im directen Verhältnisse steht, von einander zu entfernen streben, so daß e nach f und d nach c hin bewegt wird. Man sieht, daß hier die Verdichtung von d, e aus nach beiden Seiten der Röhre hin fortschreitet. Und so verhält es sich auch bei der ersten Erregung einer Verdichtung

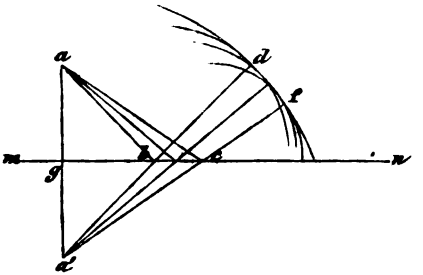
Digitized by Google

in der freien Luft, sie pflanzt sich nach allen Richtungen hin fort. Denkt man sich jedoch die Theilchen zwar auch verdichtet, aber ihnen zugleich, wie im Falle einer fortschreitenden Welle, nach einer und derselben Richtung (z. B. nach f) hin eine Bewegung beigelegt, die eben so groß ist als diejenige, welche die durch Verdichtung erhöhte Spannkraft den Theilchen nach c und f hin mitzutheilen strebt, so ist klar, daß d von zwei gleichen Kräften nach entgegengesetzten Richtungen getrieben wird, einmal nämlich wegen der erhöhten Spannkraft zwischen ihm und e nach c hin und gleichzeitig in Folge seiner schon erlangten Geschwindigkeit nach f hin. Beide Kräfte heben sich auf und d bleibt also in Ruhe. Dagegen bewegt sich e mit einer doppelten Kraft, nämlich mit seiner ursprünglichen Geschwindigkeit und der durch die zu große Dichte in Beziehung auf d veranlaßten nach f hin, wodurch es eine Fortpflanzung der Bewegung nach dieser Seite hin bewirkt. Nun nähert sich e dem f so lange, bis es ihm so viel von seiner Geschwindigkeit mitgetheilt hat, daß die Geschwindigkeit beider gleich groß ist, und zwar halb so groß als die, welche e vorher allein hatte. Mit dem Drucke nun, den e auf f hierbei ausübt, ist gleichmäßig das von der Dichte zwischen e und f abhängende Bestreben zwischen beiden, sich von einander zu entfernen, gewachsen. Dieses Bestreben ist nach der Natur der Elasticität gleich groß als die bewegende Kraft in e und f. Es tritt mithin für die letzteren derselbe Fall ein wie vorher bei d und e, d. h. e muß zur Ruhe kommen und f sich mit derselben Geschwindigkeit nach g hin bewegen, mit der sich vorher d nach e bewegte, indem es mit der Geschwindigkeit, die ihm von e mitgetheilt wurde, und mit der, die ihm das Bestreben mittheilt, sich von e wegen der stattfindenden Verdichtung zu entfernen, weiter geht. Dies wiederholt sich bei den folgenden Lufttheilchen und läßt sich auch leicht auf die Wellenbewegung in der freien Luft übertragen. (Webers Wellenlehre S. 483).

134. Das Vorgetragene gilt, wenn die Wellenbewegung in einem gleichartigen Medium fortschreitet. Gelangt sie aber an die Grenze eines anderen von dem ersteren verschiedenen Mediums, so bilden sich im Allgemeinen zwei Wellen, von denen die eine in dem neuen Medium fortschreitet, die andere aber in das vorige zurückgeht und eine sogenannte reflectirte Welle bildet. Dies findet z. B. statt, wenn eine Schallwelle aus einem Gase in ein anderes von verschiedener Dichtigkeit übergeht. Wenn aber die ursprüngliche auf ein festes Hinderniß trifft, so kann sie auch vollständig reflectirt werden. Es sei a ein Punkt, von welchem Wellen nach der festen

Digitized by Google

Wand m n gehen. Die Punkte b und c der Wand, welche von zwei Elementarwellen zu verſchiedenen Augenblicken getroffen werden, verhalten ſich wie die Mittelpunkte neuer Wellen b d und c f. Man fälle von dem Punkte a eine Senkrechte auf m n und mache a g — a′ g. Zieht man nun von a′ durch b und c gerade Linien, bis ſie den reflectirten Wellen in d und f begegnen, ſo iſt a′ d — a′ f. Denn die ſchwingende Bewegung legt die Wege a b d und a c f in gleichen Zeiten zurück, ſo daß a b + b d = a c + c f. Wegen der congruenten Dreiecke a g b, a′ g b und a g c, a′ g c iſt a b — a′ b und a c — a′ c, mithin auch a′ b + b d — a′ c + c f oder a′ d — a′ f. Denkt man ſich mit dem Halbmeſſer a′ d eine Kugelfläche beſchrieben, ſo berührt dieſe ſowohl die beiden vorher betrachteten als auch alle anderen von den verſchiedenen Punkten der Wand ausgegangenen Elementarwellen. Die letzteren bilden zuſammen die eigentliche wirkſame Welle, welche eben nichts Anderes als jene Berührungskugel ſämmtlicher Elementarwellen iſt. Wenn alſo eine von einem Punkte ausgehende ſphäriſche Schallwelle von einer Ebene zurückgeworfen wird, ſo iſt es gerade ſo, als ob ſie von einem in der nämlichen Entfernung auf der anderen Seite der zurückwerfenden Ebene gelegenen Punkte a′ ausgegangen wäre. Stößt eine Luftwelle gegen eine feſte Wand, ſo erzeugt der verdichtete Theil der directen Welle auch den verdichteten Theil der reflectirten, ſowie der verdünnte der erſteren den verdünnten Theil der letzteren, inſofern die Theile der Wand weder ausweichen, noch auch den ſchwingenden Theilen nachfolgen können. Auch in einer cylindriſchen Röhre erfolgt eine Reflexion, wenn eine Luftwelle an das offene Ende derſelben gelangt. Weil aber die Theilchen der freien Luft leichter ausweichen als die in der Röhre befindlichen, ſo verwandelt ſich der verdichtete Theil der directen Welle in den verdünnten der reflectirten und umgekehrt.



Auf der Reflexion des Schalles beruht nun auch das Echo. Wenn die Schallwellen rechtwinkelig auf eine reflectirende Fläche fallen, ſo müſſen ſie wieder zu ihrem Ausgangspunkte zurückkehren. Nun kann aber ſelbſt ein geübtes Ohr nicht mehr als 9 Laute in der Secunde deutlich unterſcheiden, wonach auf einen Laut $^1/_9$ Secunde

Digitized by Google

kommt. Soll sich also der reflectirte Laut deutlich vom ursprünglichen unterscheiden, so muß jener gerade nach $^1/_9$ Secunde zum Ohre gelangen. Da der Schall in 1 Secunde 1050′ durchläuft, so folgt, daß die zurückwerfende Fläche $\frac{1050}{18} = 58{,}3'$ entfernt sein muß, um ein einsylbiges Echo zu gewähren. Zu einem zweisylbigen Echo gehört also eine Entfernung von 2 . 58′, u. s. w. Durch mehrere reflectirende Flächen kann eine Sylbe auch mehrmals wiederholt werden, so daß ein sogenanntes vielfaches Echo entsteht. Wenn man in dem einen Brennpunkte eines ellipsoidischen Gewölbes einen Schall erregt, so wird er nach dem anderen Brennpunkte reflectirt und daselbst durch Concentration verstärkt, so daß eine Person, welche in dem letzteren Brennpunkte steht, ein im ersteren leise ausgesprochenes Wort deutlich verstehen kann, während dies in den übrigen Punkten nicht der Fall ist. Auch Wolken können ein Echo bilden, wie man dies häufig auf dem Meere beobachtet hat. Auch hat man bemerkt, daß der Knall einer Kanone, während er bei heiterem Himmel einfach gehört wird, bei bewölktem wie das Rollen eines Donners vernommen wird. Ueberhaupt erleidet der Schall, so oft er durch ein Mittel von ungleichförmiger Beschaffenheit geht, an der Grenzfläche je zweier ungleichartiger Schichten eine theilweise Reflexion und dadurch eine Schwächung. Hieraus erklärt sich nach Humboldt auch, daß man den Schall des Nachts besser hört als bei Tage. Denn bei Tage werden durch Einwirkung der Sonne die Erdoberfläche und Luft unter verschiedenen Umständen verschieden erwärmt, woraus eine Menge Luftströmungen von verschiedener Temperatur hervorgehen, was Nachts nicht der Fall ist.

135. Bisher hatten wir es vorzugsweise mit longitudinalen Schwingungen zu thun, d. h. mit solchen, welche im Sinne der Fortpflanzung der Wellenbewegung stattfinden. Doch können auch solche Schwingungen in einem Stabe, an einer gespannten Saite oder Schnur vorkommen, welche transversal, d. h. senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Wellenbewegung sind. Werden z. B. an einer gespannten Schnur oder Saite die Theilchen eines Stückes etwas seitwärts gezogen, so müssen sie, sich selbst überlassen, wieder nach der anfänglichen Lage des Gleichgewichtes sich hin bewegen. Hierdurch werden nun auch die Theilchen des nächstfolgenden Stückes seitwärts gezogen, die ebenso wieder auf ihre nächsten Theilchen wirken, u. s. w., so daß eine an der Saite oder der Schnur fortlaufende transversale Ausbeugung entsteht, welche dem verdichteten Theile einer longitudi-

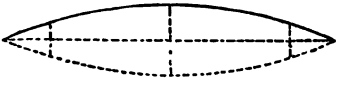
Digitized by Google

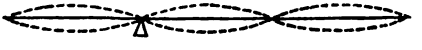
nalen Welle entspricht. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit c einer solchen Welle ist analytischen Untersuchungen zufolge, wenn man das Gewicht der Saite durch p, ihre Länge durch l, das sie spannende Gewicht durch q und die Beschleunigung der Schwere wieder durch g bezeichnet, $c = \sqrt{\frac{glq}{p}}$, eine Formel, welche die Erfahrung entschieden bestätiget. Diese Formel ist von jener im §. 131 für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer longitudinalen Welle aufgestellten verschieden. Ist demnach die anfängliche Verschiebung eines Theilchens der gespannten Saite eine schiefe, so daß sie sich in einen longitudinalen und transversalen Theil zerlegen läßt; so kann man schließen, daß zwei Wellensysteme, nämlich ein longitudinales und transversales, entstehen müssen, welche sich gesondert von einander mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen.

Zweites Kapitel.

Von den stehenden Schwingungen.

136. Wenn die Schwingungen der Theilchen eines Körpers so beschaffen sind, daß sie alle gleichzeitig ihre Bewegung beginnen und vollenden, so nennt man sie nach Weber stehende. Am einfachsten erhält man eine stehende Welle, wenn man die Mitte eines gespannten Seiles oder einer gespannten Saite nach irgend einer Richtung aus der Gleichgewichtslage entfernt und dann sich selbst überläßt. Man gewahrt dann leicht, daß sich alle Theilchen in gleichen Schwingungszuständen befinden, daß sie gleichzeitig ihre Bewegung beginnen und vollenden. Nur die Schwingungsweite verschiedener Theilchen ist verschieden, wie dies ohne Weiteres aus der Figur erhellet. Eine gespannte Saite sei durch einen Steg in zwei Theile getheilt, von denen der eine halb so groß als der andere ist.





Streicht man nun den kleineren Theil mit einem Fiedelbogen, so geräth auch der andere in Schwingungen, dergestalt, daß sich an ihm zwei gleiche Abtheilungen bilden, welche durch einen Ruhe- oder sogenannten Knotenpunkt von einander getrennt sind.

Setzt man den Steg so, daß die Saite zwei Theile erhält,

Digitized by Google

von denen der eine 4 Mal so groß als der andere ist, so entstehen beim Streichen des kleineren Theiles mit einem Fiedelbogen zwei Knoten und drei Bäuche (oder schwingende Abtheilungen), u. s. w. Die Ruhepunkte der Saite lassen sich leicht durch aufgesetzte Papierreiterchen nachweisen, indem diese nur auf solchen Punkten ruhig sitzen bleiben.

Jeder Körper, insofern er überhaupt hinsichtlich seiner Elasticität zur Wellenbewegung geeignet ist, kann in stehende Vibrationen versetzt werden. Ertheilt man einem solchen Körper an irgend einer Stelle einen Stoß, so entsteht eine Wellenbewegung, welche aber an den Grenzen des Körpers reflectirt wird. Kehrt nun der Stoß regelmäßig und schnell wieder, so müssen die reflectirten Wellen den directen begegnen, aus deren Zusammentreffen eben die stehende Welle hervorgehet, wobei freilich viel auf die Dimensionen des Körpers und die Art der Erregung der Wellen ankommt. Die Punkte, in welchen sich die Bewegung aufhebt, bilden bestimmte Flächen, welche auf der Oberfläche des Körpers als sogenannte Knotenlinien erscheinen. Solche stehende Schwingungen sind es, welche das Selbsttönen der Körper erzeugen, während die bloße Fortpflanzung des Schalles auf fortschreitenden Schwingungen beruht.

Um Platten aus irgend einem Stoffe in stehende Schwingungen zu versetzen, braucht man sie nur auf passende Weise an irgend einer Stelle zu halten und an einer anderen mit einem Fiedelbogen zu streichen. Um die Knotenlinien, welche sich während des Vibrirens bilden, sichtbar zu machen, streuet man auf die obere Fläche der Platte feinen trockenen Sand, welcher, durch die Schwingungen in Bewegung gesetzt, sich auf den Knotenlinien anhäuft. Die Knotenlinien bilden zusammen bestimmte Figuren, sogenannte Klangfiguren, welche Chladni zuerst auf die eben angegebene Weise zur Darstellung gebracht hat. Es entstehen also auch hier, wie bei gespannten Saiten, mehrere gleichzeitig schwingende Theile, welche durch Ruhelinien von einander getrennt sind. Dabei schwingen je zwei an einander grenzende Abtheilungen nach entgegengesetzten Richtungen. Man kann auf derselben Platte verschiedene Klangfiguren hervorbringen, je nachdem man mit dem Bogen rascher oder langsamer, stärker oder schwächer streicht, oder wenn man die Lage der festgehaltenen Punkte ändert und an verschiedenen Stellen des Randes streicht. Im Allgemeinen werden die Knotenlinien um so zahlreicher, also auch die Dimensionen der schwingenden Theile um so kleiner, je höher der hervorgebrachte Ton ist. Auf diese Weise erhält man oft sehr complicirte Figuren.

Digitized by Google

Hält man bei einer quadratischen Platte die Mitte fest und streicht an einer Ecke, so erhält man als Klangfigur ein Kreuz; wird dagegen unter sonst gleichen Umständen die Mitte einer Seite gestrichen, so entsteht die Figur b.

Fig. a.

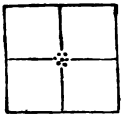
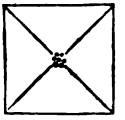


Fig. b.



In der Regel gehört zu jedem reinen Ton auch eine bestimmte regelmäßige Klangfigur, verrückt man aber die festgehaltene Stelle nur ein wenig, so zeigt sich häufig auch eine Veränderung der Klangfigur, obgleich der Ton derselbe bleibt. So geht z. B. die Figur 1 in 2 über, wenn man die festgehaltene Stelle c nur etwas nach einwärts verrückt. Bei genauerer Betrachtung gewahrt man aber, daß in solchen Fällen die Klangfigur im Wesentlichen dieselbe bleibt, da sich alle Knotenlinien immer auf dieselbe Art und Zahl zurückführen lassen. So zeigt in dem angeführten Beispiele die zweite Figur dieselbe Anzahl von Knotenlinien und daher auch von schwingenden Theilen als die erste. Platten von gleichem Stoffe, derselben Gestalt, Flächengröße und Dicke zeigen bei übereinstimmenden Schwingungen sowohl denselben Ton als auch dieselbe Klangfigur. Sind zwei derartige Scheiben blos in der Größe verschieden, so zeigen sie bei einerlei Tonfolge ähnliche Klangfiguren und die Schwingungszeiten übereinstimmender Vibrationen verhalten sich wie die Quadrat ähnlich liegender Seiten. Haben sie blos verschiedene Dicken, so stehen mit ihnen die Schwingungszeiten in directem Verhältnisse.

Fig. 1.

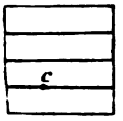
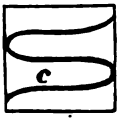
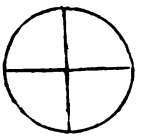


Fig. 2.

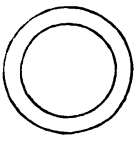


Wie quadratische Scheiben, so geben auch runde beim Anstreichen eine Menge von Tönen mit entsprechenden Klangfiguren. Die mannichfachen Figuren, welche runde Platten zeigen, lassen sich in drei Systeme bringen, nämlich in das diametrale, concentrische und gemischte. Das diametrale besteht aus Durchmessern, welche den Umfang der Scheibe in eine gerade Anzahl von Theilen theilen, wodurch die Klangfigur die Gestalt eines Sterns erhält. Der einfachste Fall ist, wo die Figur von zwei Durchmessern gebildet wird; er entspricht dem tiefsten Tone der Scheibe. Bei der nächsten Schwingungsart erscheinen die Knotenlinien in drei Durchmessern und der entstehende Ton ist über eine Octave höher als bei der vorigen.



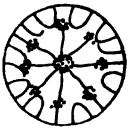
Digitized by Google

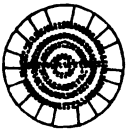
Das concentrische System besteht aus Kreisen, deren Mittelpunkte mit dem der Scheibe zusammenfallen. Die einfachste Figur

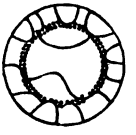


bildet einen Kreis. Um Klangfiguren mit mehreren Kreisen hervorzubringen, macht man im Mittelpunkte der Scheibe ein rundes Loch und zieht durch dieses ein Bündel Roßhaare hin und her, während man die Scheibe an einigen Stellen, durch welche Knotenlinien gehen sollen, hält.

Das gemischte System besteht aus Kreisen, welche von geraden oder krummen Linien durchschnitten werden. Häufig sind die Kreise, namentlich die äußeren, umgebogen, und zwar so, daß sie sich in eine







Zahl von Biegungen zertheilen, welche mit verschiedenen bekannten Curven mehr oder weniger Aehnlichkeit haben.

Nach Strehlke sind alle Knotenlinien gekrümmt und die scheinbar geraden Linien nur Zweige hyperbolischer Curven.

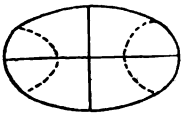
Die Schwingungen der Glocken und gekrümmten Flächen kommen im Ganzen mit denen einer ebenen Platte überein. Eine Glocke theilt sich während des Schwingens in eine gerade Zahl von Theilen, die durch Knotenlinien von einander getrennt sind und zugleich mit dem Ganzen schwingen. Füllt man eine Glocke oder auch ein Glas mit einem Fuße mit Quecksilber oder Wasser und streicht dann den Rand mit einem Fiedelbogen, so kann man sehen, wie sich die Oberfläche der Flüssigkeit kräuselt und abtheilt.

137. An Glocken und Ringen, namentlich aber an sorgfältig gearbeiteten kreisrunden Platten können die Knotenlinien eine merkwürdige Verrückung erleiden, ohne daß die Tonhöhe dadurch verändert wird. Man kann dies beobachten, wenn man eine solche Platte mit Bärlappsamen (semen lycopodii) bestreut und durch mehrere rasch hinter einander folgende Bogenstriche in Vibrationen versetzt. Durch Wiederholung dieses Verfahrens kann man die Verrückung der Knotenlinien in einem ganzen Kreise herumführen. Bei schnellen Schwingungen läßt sich auch das Bild der Sonne zur Sichtbarmachung dieser Verrückung benutzen. So ist auf einer kreisförmigen, ruhenden Platte dieses Bild oval, während des Schwingens aber sternförmig, sofern nämlich die Klangfigur diese Form hat. Sobald nun die Knotenlinien weiter rücken, zeigt auch dieser Stern eine kreisförmige Be-

Digitized by Google

wegung. Savart leitet dieſe Erſcheinung mit Grund aus einer Verſchiedenheit der Elaſticität nach verſchiedenen Richtungen ab. In Scheiben giebt es zwei Durchmeſſer, von denen einer der größten, der andere der kleinſten Elaſticität entſpricht. Streicht man nun mit einem Fiedelbogen den Rand ſo, daß die Knotenlinien gerade auf dieſe Durchmeſſer fallen, ſo bleiben ſie unbeweglich; ſobald man aber andere Punkte des Randes anſtreicht, gerathen die Knotenlinien, welche ſich bilden, in eine oscillirende Bewegung, indem ſie in die Lagen, welche der größten und kleinſten Elaſticität entſprechen, zurückzukehren ſtreben.

Da die Vibrationen der Körper hauptſächlich durch die Elaſticität bedingt ſind, ſo können ſie uns auch bis zu einer gewiſſen Grenze über die Größe und Art der Elaſticität in einem Körper belehren. Man kann ſich zu dieſem Behufe aus demſelben Körper (Holz) mehrere gleich dicke Kreisſcheiben ſchneiden und ſie in ſolche Schwingungen verſetzen, denen eine aus diametralen Linien beſtehende Klangfigur entſpricht. Nehmen dieſe Linien jede Richtung an, ſo iſt die Scheibe allenthalben gleich elaſtiſch, im Gegentheile aber nicht. Vermindert man an einer kreisförmigen Platte von Meſſing die Elaſticität nach einer Richtung durch parallele Feilſtriche, ſo kann die aus zwei auf einander ſenkrechten Durchmeſſern beſtehende Klangfigur nicht mehr jede Lage annehmen, indem man findet, daß eine dieſer Knotenlinien immer mit den Einſchnitten parallel, die andere aber darauf ſenkrecht iſt. Will man jedoch mit Gewalt eine Verrückung der Knotenlinien hervorbringen, ſo gehen die Durchmeſſer in hyperboliſche Curven über, deren Hauptaxe in der Richtung liegt, welche einer Biegung den größten Widerſtand leiſtet. Bei einer gleichartigen elliptiſchen Scheibe von Glas oder Metall fallen die auf einander ſenkrechten Knotenlinien mit den beiden Durchmeſſern der Ellipſe zuſammen. Verrückt man dieſes Syſtem mit Gewalt dadurch, daß man an den Enden dieſer Durchmeſſer ſtreicht, ſo entſteht gleichfalls eine Hyperbel, deren Hauptaxe mit der großen Axe der Ellipſe übereinkommt, welche auch einer Biegung den größten Widerſtand leiſtet.



Eine Holzſcheibe, ſenkrecht auf die Faſern geſchnitten, zeigt nach allen Richtungen, welche rechtwinklig auf dieſe Ebene ſind, eine gleiche Elaſticität, da ſie allenthalben eine Klangfigur mit diametralen Knotenlinien zeigt. Dies iſt aber nicht der Fall bei einer ſchief gegen die Faſern oder mit ihnen parallel geſchnittenen Scheibe. Drei parallelopipediſche Stäbe aus Hainbuchenholz, die nach drei verſchiedenen

Digitized by Google

und zwar auf einander ſenkrechten Richtungen geſchnitten ſind, zeigen eine verſchiedene Elaſticität, wie ſich dies aus den hervorgebrachten Tönen bei einerlei Schwingungsart ſchließen läßt. Nimmt man die Elaſticität nach der auf die Faſern ſenkrechten Richtung — 1 an, ſo iſt ſie in der gegen die Faſern ſchiefen Richtung 2,25 und in der mit den Faſern parallelen — 16. Platten von Bergkryſtall, welche ſenkrecht auf ſeine Axe geſchnitten ſind, zeigen nach allen Richtungen, welche rechtwinkelig auf dieſe Axe ſind, dieſelbe Elaſticität, weil auch hier die beiden diametralen Knotenlinien jede beliebige Lage annehmen können. Parallel oder ſchief zur Axe geſchnittene Platten haben dagegen nicht nach allen Richtungen eine gleiche Elaſticität. Aehnliches zeigt der Doppelſpath.

138. Vergleicht man die Knotenlinien in der Luft mit den im leeren Raume erzeugten, ſo ergeben ſich häufig Unterſchiede, welche Faraday und Savart durch Verſuche entſchieden herausgeſtellt haben. Der Grund liegt nach ihnen darin, daß ſich während des Schwingens zu beiden Seiten der Knotenlinien entgegengeſetzte Luftſtrömungen und in Folge deſſen Wirbel nach den Stellen der ſtärkſten Bewegung hin bilden. Dieſe Wirbel nehmen den aufgeſtreuten leichteren Staub mit in die Höhe und laſſen ihn an den genannten Stellen fallen.

139. Wir wiſſen, daß eine geſpannte Saite durch einen Strich mit einem Fiedelbogen, und zwar rechtwinklig auf ihre Länge, in ſtehende Querſchwingungen verſetzt wird. Man bemerkt auch, daß der Ton, welcher hierdurch hervorgebracht werden kann, um ſo höher wird, je mehr man die Saite verkürzt oder an Spannung zunehmen läßt. Zugleich zeigt ſich, daß die Schwingungsgeſchwindigkeit mit der Höhe des Tones in directem Verhältniſſe ſteht. Wir haben auch geſehen, daß ſich die Saite in noch mehrere gleichzeitig ſchwingende Theile abtheilen kann, welche durch Ruhepunkte von einander getrennt ſind. Nach §. 135 hat die Geſchwindigkeit c einer transverſalen Welle ihren Ausdruck in der Formel $c = \sqrt{\frac{glq}{p}}$, wo die Buchſtaben unter dem Wurzelzeichen die dort angegebene Bedeutung haben. Bezeichnet man nun die Länge der Saite oder auch eines Stückes derſelben, welches von zwei Knotenpunkten begrenzt iſt, durch l, die Anzahl der Schwingungen, welche die Saite in 1 Secunde macht, durch n, ſo iſt analytiſchen Unterſuchungen zufolge $n = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{gq}{pl}}$. Die Anzahl der Schwingungen in 1 Secunde oder die Tonhöhe iſt

Digitized by Google

also der Quadratwurzel aus der Spannung q direct proportional. Für eine cylindrische Saite ist bekanntlich $p = \frac{1}{4}\pi d^2 l s$, wenn d ihren Durchmesser und s das specif. Gewicht des Stoffes bezeichnet, aus dem sie besteht. Dadurch hat man $n = \frac{1}{l d}\sqrt{\frac{g q}{\pi s}}$. Die Schwingungszahl ist hier also auch der Länge und Dicke der Saite, sowie der Quadratwurzel aus dem specif. Gewichte oder der Dichte umgekehrt proportional. Die Schwingungszahlen zweier Saiten von verschiedenem Stoffe verhalten sich mithin unter sonst gleichen Umständen wie die Quadratwurzeln aus ihren specif. Gewichten oder Dichtigkeiten.

Man kann diese Gesetze mit Hülfe des sogenannten Monochord durch den Versuch nachweisen. Das Instrument besteht im Wesentlichen aus einer Saite, welche über einen Resonanzboden gespannt ist. Ein Ende derselben ist befestigt, während das andere über eine Rolle geht und ein Gewicht trägt, um der Saite die nöthige Spannung zu geben. Auch befinden sich unter der Saite zwei Stege, von denen der eine hin und her geschoben werden kann, ohne die Saite zu berühren. Dieser Steg dient, der Saite eine beliebige Länge zu geben, indem man ihn an die bestimmte Stelle schiebt und die Saite durch eine Preßschraube einklemmt. Giebt nun die Saite bei gehöriger Spannung und frei schwingend einen vollen und reinen Ton, so kann man von diesem ausgehend durch Verschiebung des beweglichen Steges der Reihe nach die in der Musik bekannten Töne C, D, E, F, G, A, H, c hervorbringen, wenn man den ersten als Grundton durch C bezeichnet. Nimmt man die Länge der Saite, welche den Grundton giebt, als Einheit an, so entsprechen den auf einander folgenden Tönen die nachstehenden Saitenlängen und Schwingungszahlen:

C	D	E	F	G	A	H	c
1	$^8/_9$	$^4/_5$	$^3/_4$	$^2/_3$	$^3/_5$	$^8/_{15}$	$^1/_2$
1	$^9/_8$	$^5/_4$	$^4/_3$	$^3/_2$	$^5/_3$	$^{15}/_8$	2.

Der Octave c entspricht also eine halb so große Saitenlänge als dem Grundtone, während die Schwingungszahl doppelt so groß ist. Wollte man die Octave bei gleicher Saitenlänge hervorbringen, so müßte man die Saite viermal so stark anspannen.

Auf dieselbe Weise kann man von c aus zu noch höheren Tönen übergehen, deren Grundton nun c ist.

Das Verhältniß der Schwingungszahlen je zweier Töne nennt man ihr Intervall. Die Töne, welche mit C einen befriedigenden

Digitized by Google

Eindruck auf unſeren Geiſt üben, ſind meiſt ſolche, deren Schwingungszahl mit der von C in einem einfachen Verhältniſſe ſteht; ſo z. B. Grundton und Octave (1 : 2) oder Grundton und Quinte (2 : 3); das Gegentheil findet ſtatt bei dem Grundtone und der Secunde oder der Septime. Man hat für jeden Grundton zwei Scalen, nämlich die ſogenannte harte und weiche. Beide unterſcheiden ſich darin, daß die Terz bei letzterer niedriger iſt, weshalb ſie auch kleine Terz (Es) genannt wird. Der Grundton C mit der großen Terz E und der Quinte G bildet den ſogenannten großen Dreiklang oder den C dur-Accord, während C und G mit der kleinen Terz den kleinen Dreiklang oder C moll-Accord geben.

Vergleicht man in der oben gegebenen Scale die Intervalle je zweier unmittelbar auf einander folgender Töne mit einander, ſo gewahrt man, daß ſie nicht gleich groß ſind. Man erhält nämlich nach und nach $^9/_8 : 1 = {}^9/_8$, $^5/_4 : {}^9/_8 = {}^{10}/_9$, $^4/_3 : {}^5/_4 = {}^{16}/_{15}$, $^3/_2 : {}^4/_3 = {}^9/_8$, $^5/_3 : {}^3/_2 = {}^{10}/_9$, $^{15}/_8 : {}^5/_3 = {}^9/_8$, $2 : {}^{15}/_8 = {}^{16}/_{15}$. Die Schwingungszahl der kleinen Terz Es iſt $^6/_5$, während die der großen E $^5/_4$ iſt; ihr Verhältniß alſo $^5/_4 : {}^6/_5 = {}^{25}/_{24}$. Das größte Intervall, welches ſich hier überhaupt zeigt, iſt $^9/_8$, man nennt es deshalb das eines großen ganzen Tones; das nächſtfolgende $^{10}/_9$ iſt das eines kleinen ganzen Tones; das nun nächſt kleinere $^{16}/_{15}$ iſt das eines großen halben Tones und das kleinſte $^{25}/_{24}$ das eines kleinen halben Tones. Das Intervall zwiſchen einem großen und kleinen ganzen Ton $^9/_8 : {}^{10}/_9 = {}^{81}/_{80}$ nennt man ein Comma.

Die obige Scale enthält nicht alle Töne, welche zwiſchen dem Grundtone und der Octave überhaupt möglich ſind. Auch reichen die gegebenen Töne nicht aus, wenn man von jedem Tone der Scale aus nach Intervallen fortſchreiten will, welche von den angeführten nicht merklich abweichen. Man ſieht ſich deshalb genöthigt, zwiſchen C und D, F und G, G und H noch halbe Töne einzuſchalten, die in der Muſik durch cis, es, fis, gis und b bezeichnet werden. Auf dieſe Weiſe erhält man 12 Töne, welche die ſogenannte chromatiſche Tonleiter ausmachen.

Wollte man nach durchaus reinen Verhältniſſen von einem Tone zum anderen fortſchreiten, ſo würde man ſich allmälig immer mehr von dem reinen Verhältniß zum Grundtone entfernen. Iſt die Schwingungszahl oder Tonhöhe des Grundtones 1, ſo iſt nach dem Obigen die der großen-Terz $^5/_4$, die der zweiten großen Terz $^5/_4 \cdot {}^5/_4 = {}^{25}/_{16}$ und die der dritten großen Terz $^5/_4 \cdot {}^5/_4 \cdot {}^5/_4 = {}^{125}/_{64}$. Nun ſollte der letztere Ton mit der Octave des Grundtones, deren Tonwerth

Digitized by Google

$2 - {}^{128}/_{64}$ ist, übereinstimmen, was aber, wie man sieht, nicht der Fall ist. Die Reinheit der Octaven geht also verloren, wenn man nach reinen Terzen fortschreitet, und umgekehrt, schreitet man nach reinen Octaven fort, so büßt man die Reinheit der Terzen ein. Dasselbe findet sich, wenn man nach reinen Quinten fortzuschreiten versucht. Da nun eine Abweichung von der Reinheit der Octaven dem Ohre unerträglich ist, so vertheilt man die Abweichung auf die übrigen Töne, wodurch denn dasjenige entsteht, was man in der Musik das Temperiren der Töne oder die Temperatur nennt. Man unterscheidet die gleichschwebende und ungleichschwebende Temperatur, je nachdem sich die Ausgleichung auf alle Töne gleichmäßig oder nur auf einen Theil derselben erstreckt. Bei der gleichschwebenden Temperatur sind alle Intervalle gleich und die Töne der Scale bilden eine geometrische Progression. Da das erste Glied dieser Progression 1, das letzte 2 und die Anzahl der Glieder mit Einschluß des Grundtones und der Octave — 13 ist, so läßt sich aus der Formel für das allgemeine Glied einer geometrischen Reihe leicht der Exponent jener Progression und daher auch jedes einzelne Glied desselben berechnen. Wiewohl bei der gleichschwebenden Temperatur kein Intervall ganz rein ist, so ist doch die Abweichung von der vollkommenen Reinheit geringer als bei irgend einer anderen Anordnung.

Ueber die gleichschwebende Temperatur und manches andere hierher Gehörige sehe man auch Herbart's mathematisch-psychologische Untersuchungen, Heft I.

140. Eine gespannte Saite kann auch ihrer Länge nach in stehende Schwingungen (Longitudinalschwingungen) versetzt werden, wenn man sie mit einem Bogen unter einem sehr spitzen Winkel streicht. Ihre Theile ziehen und dehnen sich dabei der Länge nach abwechselnd zusammen und wieder aus. Auch hier kann eine Saite mit oder ohne Knoten schwingen. Es bildet sich ein Ruhepunkt in der Mitte, wenn man sie daselbst während des Streichens berührt; ebenso kann man 2 oder 3 Schwingungsknoten hervorbringen, wenn man sie in $^1/_3$ oder $^1/_4$ ihrer Länge sanft hält, u. s. w. Je größer die Zahl der Schwingungsknoten, desto höher ist auch der Ton. Nach §. 132 ist die Geschwindigkeit einer longitudinalen Verschiebung $c = \sqrt{\frac{g}{\lambda}}$, wo nämlich g die Beschleunigung der Schwere und λ die Verlängerung bezeichnet, welche eine Saite von der Länge 1 erleidet, wenn sie durch ihr eigenes Gewicht gespannt wird. Ist nun l die Länge

Digitized by Google

einer Saite, so läßt sich die Schwingungszahl n durch die Formel ausdrücken: $n = \frac{1}{2l}\sqrt{\frac{g}{\lambda}}$. Vergleicht man diese Formel mit der für transversale Schwingungen aufgestellten, so zeigt sich, daß hier wie dort die Schwingungszahl oder Tonhöhe im umgekehrten Verhältnisse mit der Länge der Saite steht. Dagegen ist hier die Tonhöhe unabhängig von der Dicke und (wenigstens bis zu einem gewissen Grade) auch von der Spannung der Saite, nicht aber von dem Stoffe, welcher vielmehr von wichtigem Einflusse sein muß. Dann giebt auch ein und dieselbe Saite bei Longitudinalschwingungen höhere Töne als bei Querschwingungen.

Eine schmale, nach der Länge gespannte Membran macht ähnliche Schwingungen wie eine Saite, während eine breite Schwingungsgesetze befolgt, welche mit den früher bei elastischen Scheiben erörterten übereinkommen. Durch aufgestreuten Sand lassen sich auch bei ihnen die Knotenlinien sichtbar machen.

141. Verschieden von den Schwingungsgesetzen der Saiten sind die elastischer Stäbe, wiewohl auch bei ihnen die Schwingungen sowohl im longitudinalen als im transversalen Sinne geschehen können. Bei Saiten ist die Elasticität vorzugsweise, wenn auch nicht allein, nach der Länge wirksam, bei Stäben von Metall, Glas, Holz u. dgl. aber meist nach allen Richtungen. Eine homogene, längliche Stahlplatte oder ein schmaler Glasstreifen läßt sich in transversale Schwingungen versetzen, wenn man ihn mit einem Fiedelbogen der Quere nach streicht. Schwingungsknoten lassen sich wie bei Saiten hervorbringen, wenn man auf die Punkte, durch welche Knotenlinien gehen sollen, mit dem Finger oder auf irgend eine andere Art sanft drückt. Durch aufgestreuten feinen und trockenen Sand werden sie sichtbar. Auch kann man in einem und demselben Stabe verschiedene Schwingungsarten hervorrufen, je nach dem Zustande, in welchem sich derselbe während des Schwingens befindet. Nämlich das eine Ende des Stabes kann fest und das andere frei sein, oder das eine kann sich blos gegen eine feste Ebene stützen und das andere frei oder fest sein, oder beide Enden sind ganz fest oder blos angestemmt oder endlich beide ganz frei. Einem jeden Falle entspricht eine besondere Folge von Tönen. Ein an beiden Seiten angestemmter Stab schwingt zwar wie eine Saite, doch folgen dabei die Tonhöhen in einer anderen Ordnung auf einander. Wird ein schmaler Streifen oder Stab vermittelst eines Schraubestockes an einem Ende befestigt und dann in Vibrationen versetzt, so verhalten sich die Tonhöhen oder

Digitized by Google

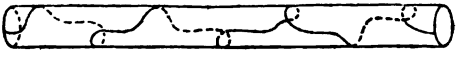
Schwingungszahlen wie die Quadratwurzeln aus der ſchwingenden Länge des dünnen Stabes.

Um gerade elaſtiſche Stäbe in Längenſchwingungen zu verſetzen, reibt man ſie der Länge nach mit einem feuchten Tuche. Die Schwingungsknoten laſſen ſich hier wie im vorigen Falle hervorbringen und ſichtbar machen. Auch hier geben, wie bei Saiten, die Longitudinalſchwingungen unter faſt gleichen Umſtänden einen höheren Ton als die Transverſalſchwingungen. Hält man einen Stab in der Mitte ſeiner Länge, während man eine ſeiner Hälften reibt, ſo giebt er den tiefſten Ton oder den Grundton, deſſen Zahlwerth als Einheit angenommen wird. Die Schwingungszahlen aller übrigen Töne, welche der Stab bei hinreichender Länge noch hören läßt, liegen in der Reihe der natürlichen Zahlen 1, 2, 3, 4, 5 ... n. Dies gilt, ſowohl wenn der Stab ganz frei als auch wenn er an beiden Enden befeſtigt iſt. Iſt er dagegen nur an einem Ende befeſtigt, ſo verhalten ſich die auf einander folgenden Tonhöhen, wenn man ihn der Länge nach reibt, wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, ...

Die Schwingungen der Stäbe ſind im Allgemeinen unabhängig von der Dicke, ſo daß zwei Stäbe von einerlei Länge und Stoff auch denſelben Grundton geben.

Um Glasſtäbe in Längenſchwingungen zu verſetzen, kann man ſie auch mit einem kleineren Stabe in der Richtung ihrer Axe verbinden und dieſen durch Reiben in den ſchwingenden Zuſtand bringen, welcher ſich dann dem größeren mittheilt.

Will man die Knotenlinien, welche ſich bei Längenſchwingungen an cylindriſchen Stäben oder Röhren von Glas bilden, ſichtbar machen, ſo behänge man den Stab oder die Röhre von außen mit einem ſchmalen Papierringe und reibe ſie der Länge nach. Den Punkt nun, auf welchem der Ring ruhig hängen bleibt, bezeichne man, drehe darauf die Röhre ein wenig um ihre Axe und verfahre auf die vorige Weiſe, wodurch man einen zweiten Ruhepunkt entdeckt. Dreht man ſo die Röhre weiter um ihre Axe herum, ſo erhält man eine Reihe von Ruhepunkten, welche mit einander verbunden eine Knotenlinie bilden, wie die Figur zeigt. Man ſieht, daß die Knotenpunkte in einer ſchraubenförmigen Linie liegen, deren Windungen aber nicht ganz regelmäßig ſind. Manche Röhren, welche man in der Mitte hält und an einem Ende reibt, zeigen auf der einen Hälfte eine rechtsgewundene, auf der anderen eine linksgewundene Schrau-



Digitized by Google

benlinie, dergeſtalt, daß beide in der Mitte aufzuhören ſcheinen. Andere Röhren zeigen wieder andere Abweichungen. Bringt man in das Innere einer Röhre trockene Sandkörner, ſo läßt ſich auch auf der inneren Fläche der Röhre eine ähnliche Knotenlinie nachweiſen.

Wenn man einen langen, dünnen Glasſtreifen mit Sand beſtreut und dann in Schwingungen verſetzt, z. B. dadurch, daß man ihn in der Mitte hält und an einem Ende mit einem feſten Körper ſchlägt, ſo bildet ſich eine Knotenlinie, welche bei einem und demſelben Streifen unverändert bleibt, gleichviel, gegen welches ſeiner Enden man ſchlägt. Kehrt man aber den Streifen um und bringt ihn, nachdem man die obere Fläche wieder mit Sand beſtreut hat, auf die angegebene Weiſe von Neuem zum Schwingen, ſo zeigt die Knotenlinie eine andere Geſtalt und bei einer gewiſſen Dicke des Streifens (2 — 3 Millimeter) ſind die einzelnen Theile der Knotenlinie auf der einen Fläche ſo vertheilt, daß jeder Theil der Mitte eines ſchwingenden Theiles der anderen gegenüberliegt.

Man hat dies durch die Annahme zu erklären geſucht, daß ſich mit den Longitudinalſchwingungen gleichzeitig Transverſalſchwingungen bilden, indem die Streifen in Folge der erſteren ſich etwas krümmen. Dieſe Knotenpunkte ſind daher nicht Ruhepunkte in Beziehung auf die Längenſchwingungen, ſondern nur in Rückſicht auf jene Transverſalſchwingungen.

Allerdings iſt es der Natur der Sache nach ſehr wahrſcheinlich, daß mit den Längenſchwingungen der Theilchen eines Stabes auch gleichzeitig in Folge der Verdichtung der Materie transverſale Schwingungen auftreten, was auch mit analytiſchen Unterſuchungen übereinſtimmt. Und ſo können wieder umgekehrt Transverſalſchwingungen von Längenſchwingungen begleitet ſein, inſofern erſtere zugleich mit einer wechſelnden Entfernung und Wiederannäherung der Theilchen nach der Länge eines Körpers verbunden ſind. —

Die Schwingungen gekrümmter Stäbe befolgen im Allgemeinen dieſelben Geſetze wie die geraden Stäbe. Doch beobachtet man bei erſteren höhere Töne, weil die Schwingungsknoten eben wegen der Krümmung einander näher gerückt werden.

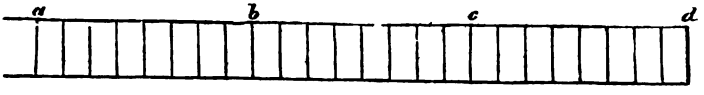
142. Endlich kann auch noch das Gleichgewicht der Attraction und Repulſion ſtarrer Körper dadurch geſtört werden, daß man ihnen eine drehende Bewegung mittheilt. Indem nun die Theilchen in die urſprüngliche Lage zurückzukehren ſtreben, machen ſie um die letztere Schwingungen, welche man *drehende* nennt. Schwingungen dieſer Art erregt man z. B. an einem cylindriſchen Stabe, wenn man ihn

Digitized by Google

an einem Ende befeſtigt und am anderen in drehender Bewegung mit einem Bogen ſtreicht. Auch ſolche Schwingungen erzeugen, wenn ſie hinlänglich ſchnell ſind, einen Ton.

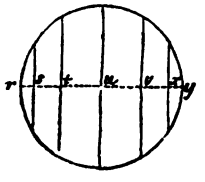
143. Wir haben ſchon früher bemerkt, daß auch in einer Luftſäule aus dem Zuſammentreffen directer und reflectirter Wellen ſtehende Schwingungen entſtehen können. Betrachten wir eine Luftſäule in einer an einem Ende offenen, am anderen aber geſchloſ-

Fig. 1.



ſenen Röhre. Gelangt in dieſe Röhre eine Luftwelle, ſo muß dieſelbe am verſchloſſenen Ende reflectirt werden und alſo in entgegengeſetzter Richtung nach dem offenen Ende zurückgehen. Die Länge der Röhre betrage $^1/_4$ von der Länge der einfallenden Welle, ſo daß die Luftſchichten bei a, b, c und d um $^1/_{12}$ Wellenlänge von einander entfernt ſind. Auch ſei in vergrößertem Maßſtabe ry die Oscillationsweite oder, was daſſelbe iſt, die Länge des Weges, um welchen die einzelnen Luftheilchen während der Fortpflanzung der einfallenden Welle hin und her gehen. Die Theilchen rs, st, ..., welche das Geſetz des Wachſens und Abnehmens der Geſchwindigkeit anſchaulich machen, ſind wie in §. 129 gefunden.

Fig. 2.



In dem Augenblicke nun, in welchem der verdichtete Theil der einfallenden Welle gerade bei d ankommt, würde ſich die unmittelbar an d grenzende Luftſchicht um die Länge ru nach der Rechten hin entfernt haben, wenn bei d die Röhre nicht durch eine feſte Wand verſchloſſen wäre. Die Luftſchicht c würde aber durch die einfallende Welle ſchon um rv, die Luftſchicht b um rx und endlich die Luftſchicht a um ry von der anfänglichen Lage entfernt worden ſein. Unter der Vorausſetzung aber, daß die Röhre bei d verſchloſſen iſt, muß, wenn das Maximum der Verdichtung der einfallenden Welle bei d anlangt, der vorangehende Theil dieſer Welle ſchon von d nach a hin reflectirt worden ſein. Wäre die feſte Wand bei d nicht vorhanden, ſo würde die einfallende Welle in dem Augenblicke, wo das Maximum der Verdichtung bei d ankommt, ſchon um $^1/_4$ Wellenlänge weiter fortgeſchritten ſein. Eine Luftſchicht aber, die um $^1/_{12}$

Digitized by Google

Wellenlänge rechts von d liegt, würde um rt, eine ſolche, welche um $^2/_{12}$ Wellenlänge rechts von d liegt, gerade um rs von ihrer anfänglichen Gleichgewichtslage nach der Rechten hin verrückt ſein, während eine Luftſchicht, die $^1/_4$ Wellenlänge rechts von d liegt, eben ihre Bewegung beginnen würde. Da aber die Röhre bei d verſchloſſen iſt, ſo wird hier die Welle reflectirt, und die reflectirte Welle wirkt nun auf die Luftheilchen in der Röhre ebenſo, nur in entgegengeſetzter Richtung, wie es nach dem eben Geſagten bei den gleichweit rechts von d gelegenen Luftſchichten der Fall ſein würde, wenn ſich die einfallende Welle über d hinaus ohne Hinderniß ausbreiten könnte. Alſo iſt die Luftſchicht c durch die reflectirte Welle um rt, die Luftſchicht b um die Länge rs nach der Linken hin verrückt, während die Luftſchicht a in dieſem Augenblicke von der reflectirten Welle noch keinen Einfluß erfahren hat. Faſſen wir das Bisherige zuſammen, ſo iſt durch

die einfallende Welle	die reflectirte Welle
die Luftſchicht c um rv	die Luftſchicht c um rt
" " b " rx	" " b " rs
" " c " ry	" " a " 0
nach der Rechten	nach der Linken

von der in der obigen Figur bezeichneten Gleichgewichtslage entfernt.

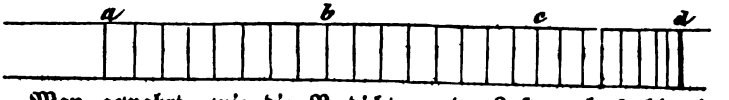
Durch das Zuſammentreffen des einfallenden und reflectirten Wellenſyſtems iſt alſo

die Luftſchicht c um	rv — rt
" " b "	rx — rs
" " a "	ry

nach der Rechten hin von der Gleichgewichtslage entfernt.

Die gegenſeitige Lage der Luftſchichten, welche in dem angegebenen Moment aus dem Zuſammentreffen des einfallenden und reflectirten Wellenſyſtems hervorgeht, zeigt nachſtehende Figur.

Fig. 3.



Man gewahrt, wie die Verdichtung der Luft nach d hin beſtändig zunimmt, während die Luftſchichten bei a faſt noch dieſelbe Dichte haben als die äußere Luft.

Da ry (Fig. 2) der Weg iſt, in welchem eine einzelne Luftſchicht in Folge einer fortſchreitenden Wellenbewegung hin und her geht, ſo kann, wie wir wiſſen, die Geſchwindigkeit auf dieſem Wege nicht

Digitized by Google

gleichförmig sein; sie wächst von r nach u und nimmt von da nach y ab. Dagegen ist die Geschwindigkeit in r und y gleich, nämlich beiderseits 0; auch ist sie dieselbe in t und v, in s und x.

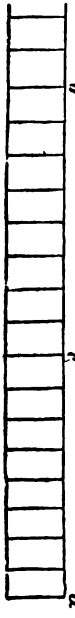
Wenn nun die Luftschicht c durch die einfallende Welle nach der Rechten hin um rv, durch die reflectirte Welle aber nach der Linken hin um rt von der Gleichgewichtslage entfernt ist, so muß offenbar die Geschwindigkeit, mit welcher die erstere Welle das Theilchen c antreibt, derjenigen gleich und entgegengesetzt sein, mit welcher die andere auf dasselbe wirkt, so daß die Luftschicht c für den Augenblick in Ruhe ist. Dasselbe gilt auch für b und a. Daher sind alle einzelnen Luftschichten zwischen a und d zwar momentan in Ruhe, beginnen aber gleichzeitig ihre Bewegung nach der Linken hin. Denn die Geschwindigkeit, mit welcher das Theilchen c durch das einfallende Wellensystem zu einer Bewegung nach der Rechten hin angeregt wird, ist im Abnehmen begriffen, während die Geschwindigkeit, welche ihm das reflectirte Wellensystem nach der Linken ertheilt, im Zunehmen begriffen ist. Die erstere Geschwindigkeit entspricht nämlich Fig. 2 der Entfernung rv, die letztere aber der Entfernung rt von der Gleichgewichtslage. Da also die Luftschicht c mit gleicher Geschwindigkeit nach der Rechten und Linken getrieben wird, die erste Geschwindigkeit aber im Abnehmen, die zweite im Zunehmen begriffen ist, so muß sie sich nach der Linken hin bewegen. Dasselbe gilt für die Luftschicht b, während die Luftschicht a durch beide Wellensysteme mit vereinter Kraft nach der Linken getrieben wird.

Alle Luftschichten zwischen a und d beginnen also gleichzeitig ihre Bewegung nach der Linken hin und gelangen nach ¼ Oscillation in ihre anfängliche Gleichgewichtslage, über welche sie aber, da sie in ihr die größte Geschwindigkeit haben, hinausgehen, so daß sie nach ½ Oscillation in die gegenseitige Lage gerathen, welche die folgende Figur darstellt.

Gerade in dem Moment, wo das Maximum der Verdünnung bei d eintritt, wird die Geschwindigkeit der einzelnen Luftschichten gleich 0 und die Bewegung beginnt wieder nach der Rechten hin. Daß in diesem Augenblicke die einzelnen Luftschichten die in der Figur bezeichnete Lage haben müssen, ist leicht einzusehen. Denn beim einfallenden Wellensysteme wird, wenn das Maximum der Verdünnung in d anlangt, das in Fig. 1 um ¼ Wellenlänge vor d liegende Theilchen a gerade eine Schwingung vollendet haben und sich in seiner Gleichgewichtslage befinden. Dagegen würde, wenn sich die Welle über d hinaus ungehindert ausbreiten könnte, ein ¼ Wellen-

Digitized by Google

Fig. 4.



länge rechts von d liegendes Theilchen in diesem Moment um die Länge ry nach der Rechten von der Gleichgewichtslage entfernt sein. Gerade so weit ist die Luftschicht a durch die reflectirte Welle nach der Linken hin von der Gleichgewichtslage entfernt, wie dies nebenstehende Figur darstellt. Auf dieselbe Weise ergiebt sich die Lage der Theilchen b und c.

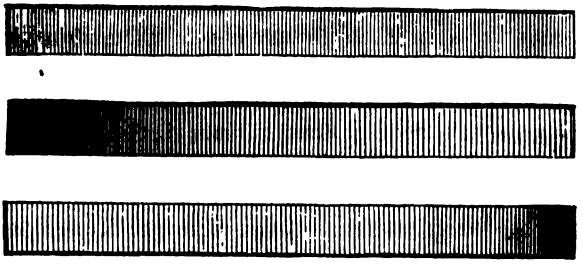
Wie im vorigen Falle die Luftschichten nach d hin immer dichter wurden, so werden sie jetzt fortwährend dünner, während die Luftschichten in der Nähe von a nur wenig weiter auseinander liegen als in Fig. 1, welche die Schichten in ihrer Gleichgewichtslage darstellt.

Sobald nun die einzelnen Luftschichten die Stellung Fig. 4 erlangt haben, bewegen sich alle gleichzeitig nach der Rechten hin, bis sie wieder in die gegenseitige Lage Fig. 3 kommen. Man sieht also, daß die Luft bei d abwechselnd verdichtet und verdünnt wird, was freilich auch, aber bei weitem nicht in dem Grade, für die weiter gegen a gelegenen Schichten gilt. Dagegen ist die Schwingungsweite für die in der Nähe von a liegenden Theilchen bedeutender als für die Theilchen nach d hin, so daß die Größe der Schwingungsbahn für die einzelnen Theilchen von d nach a wächst; für c ist diese Bahn größer als für d, für b größer als für c und für a wieder größer als für b. In der Nähe der Oeffnung der Röhre findet also nach dem Obigen weder eine merkliche Verdichtung noch Verdünnung der Luft statt, aber die einzelnen Schichten bewegen sich hier zwischen den weitesten Grenzen hin und her, während am verschlossenen Ende, wo die Luft abwechselnd aus dem Zustande der Verdichtung in den der Verdünnung übergeht, die einzelnen Theilchen die geringste Schwingungsweite haben. Man gewahrt hier den Gegensatz zwischen den fortschreitenden und stehenden Wellen. In den ersteren haben die schwingenden Theile bei der größten Abweichung von der Gleichgewichtslage auch die größte Geschwindigkeit, in den letzteren aber die kleinste. Beim Eintritte in die anfängliche Lage wird dort die Geschwindigkeit gleich 0, während sie hier ihr Maximum erreicht. Aus diesem letzteren Umstande folgt, daß eine stehende Schwingung sich mehrmals wiederholt, wenn auch die erregende Ursache aufgehört hat zu wirken, daß aber bei der fortschreitenden Welle die schwingenden Theilchen beim Eintritte in ihre ursprüngliche Lage zur Ruhe

Digitized by Google

kommen müſſen, falls nicht das innere Gleichgewicht von Neuem geſtört wird.

Wir haben nun geſehen, wie ſich durch das Zuſammentreffen des einfallenden und reflectirten Wellenſyſtemes eine ſtehende Luftwelle bildet, bei welcher alle einzelnen Schichten gleichzeitig ihre Bewegung beginnen und vollenden. Die nachſtehenden Figuren verſinnlichen die bei einer ſtehenden Luftwelle abwechſelnden Verdichtungen und Verdünnungen. Die erſte zeigt durch gleichförmige Schattirung die Luft im Zuſtande gleichförmiger Dichte, wie dies dann der Fall iſt, wenn die einzelnen Schichten mit dem Maximum ihrer Geſchwindigkeit gerade die Gleichgewichtslage durchlaufen. Haben die Theilchen gegen das verſchloſſene Ende der Röhre hin den äußerſten Punkt ihrer Bahn erreicht, ſo findet hier eine Verdichtung ſtatt, welche die zweite Figur zeigt. Alsdann bewegen ſich die Luftſchichten von dem verſchloſſenen Ende nach der Oeffnung hin, ſo daß nach ½ Oscillation an jenem Ende eine Verdünnung eintritt, welche die dritte Figur angiebt. An der Oeffnung ſelbſt aber erzeugt ſich, wie ſchon bemerkt, keine merkliche Verdichtung oder Verdünnung. Man ſieht wohl, daß die Bildung



der ſtehenden Welle geſtört werden würde, wenn man in der Nähe des verſchloſſenen Endes, wo abwechſelnd Verdichtung und Verdünnung ſtattfindet, ein Loch machte, denn im Augenblicke der Verdichtung würde Luft austreten und im entgegengeſetzten Falle äußere Luft einſtrömen. Eine ähnliche Störung würde das Durchſchneiden der Röhre an einer ſolchen Stelle hervorbringen.

Hieraus erkennt man nun, daß die Bildung einer ſtehenden Luftwelle an ein beſtimmtes Verhältniß zwiſchen der Länge der Röhre und der Länge der einfallenden Welle gebunden iſt. In unſerem bisher betrachteten Falle betrug die Länge der Röhre ¼ von der Länge der einfallenden Welle. Den zur Bildung einer ſtehenden Luftwelle erforderlichen Bedingungen, welche ſich aus dem Obigen unmittelbar ergeben, wird aber auch Genüge geleiſtet, wenn die Röh-

Digitized by Google

renlänge $^3/_4$, $^5/_4$, $^7/_4$, ... der Wellenlänge des einfallenden Schalles beträgt. Bei ſolchen Röhrenlängen bilden ſich nun auch in der Luftſäule Schwingungsknoten oder Luftſchichten, denen entweder keine oder doch die geringſte Bewegung unter allen anderen zukommt. Die zu beiden Seiten eines Knotens liegenden Luftſchichten bewegen ſich gleichzeitig zu ihm hin und wieder von ihm weg. Diejenigen Stellen der Luftſäule aber, in welchen weder eine Verdichtung noch eine Verdünnung ſtattfindet, nennt man Bäuche; in ihnen haben die Luftſchichten, wie in unſerem obigen Falle an der Oeffnung der Röhre, die größte Schwingungsweite. So entſteht in einer Röhre, deren Länge gleich $^3/_4$ der Wellenlänge iſt, 1 Schwingungsknoten; es können ſich ſolcher aber auch je nach dem Verhältniſſe der Länge der Röhre zur Länge der einfallenden Welle mehrere bilden.

In einer offenen Röhre können ſich nun eben ſowohl wie in einer an einem Ende verſchloſſenen ſtehende Schwingungen erzeugen. Denn ſobald der verdichtete Theil der einfallenden Welle am offenen Ende der Röhre austritt, müſſen ſich hier die Lufttheilchen nach allen Seiten hin ausbreiten, und die verdünnte Welle, welche hieraus entſteht, giebt, indem ſie von der äußeren Luft in die Röhre reflectirt wird, zu einer ſtehenden Welle Veranlaſſung. Man erkennt leicht, daß die reflectirte Welle nicht ſo ſtark ſein kann wie die urſprünglich einfallende. Da am offenen Ende der Röhre immer eine Verdichtung mit einer Verdünnung zuſammenfällt, ſo kann hier nur ein Bauch entſtehen, während ſich die Schwingungsknoten im Innern der Röhre bilden müſſen.

144. Stehende Schwingungen können nun auf verſchiedene Weiſe in einer Röhre erregt werden. Jeder vibrirende Körper kann hierzu verwendet werden, indem man ihn vor das offene Ende der Röhre bringt, falls nur die Länge der Röhre in einem ſchicklichen Verhältniſſe zur Wellenlänge des Tones ſteht, welchen der vibrirende Körper hervorbringt. So z. B. eine Glas- oder Metallplatte, die durch Streichen mit einem Fiedelbogen zum Tönen gebracht wird, oder auch eine gewöhnliche Stimmgabel, wenn man ſie über eine unten verſchloſſene Glasröhre hält. Einer ſolchen Röhre kann man durch Eingießen von Waſſer leicht die richtige Länge geben, falls ſie in Beziehung auf die Wellenlänge des Tones zu lang ſein ſollte. Indem nun ſo die eingeſchloſſene Luftſäule in ſtehende Schwingungen geräth, wird ſie ſelbſt tönend und verſtärkt dadurch bedeutend den urſprünglichen Ton.

Dann kann man aber auch die in einer Röhre eingeſchloſſene Luftſäule dadurch in ſtehende Schwingungen verſetzen oder zum Tönen bringen, daß man die Luft in ihr durch Hineinblaſen verdichtet, wie

Digitized by Google

dies bei vielen Blasinstrumenten (Trompete, Waldhorn, u. s. w.) der Fall ist; oder indem man am Rande einen schmalen Luftstrom vorbeistreichen läßt, wie bei den Flöten, Orgelpfeifen u. dgl.

Eine an einem Ende verschlossene Röhre oder sogenannte gedeckte Pfeife giebt ihren tiefsten Ton, wenn ihre Länge $^1/_4$ der Wellenlänge des einfallenden Tones beträgt. In diesem Falle schwingt die ganze Luftsäule ungetheilt von einem Ende der Röhre zum anderen hin und her, wie wir dies im Obigen auseinander gesetzt haben. Den nächst höheren Ton giebt diese Röhre, wenn sich in der Luftsäule zwei schwingende Abtheilungen bilden, welche durch einen Knoten von einander getrennt sind. Dies findet statt, wenn die Wellenlänge des einfallenden Tones, welcher die stehenden Schwingungen hervorbringt, $^4/_3$ der Röhrenlänge oder, was dasselbe ist, wenn die Länge der Röhre $^3/_4$ der Wellenlänge beträgt. Ein nächst höherer Ton wird in derselben Pfeife erzeugt, wenn die Wellenlänge des ursprünglichen Tones $^5/_4$ ihrer Länge beträgt. In diesem Falle bilden sich zwei Schwingungsknoten in der Luftsäule. Ein noch höherer Ton bildet sich bei drei Schwingungsknoten, wo dann die Wellenlänge gleich $^7/_4$ der Röhrenlänge ist. Bezeichnet man den tiefsten Ton der Pfeife durch 1, so liegen die auf einander folgenden Tonhöhen nach dem eben Angeführten in der Reihe der ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, ...

Eine gedeckte Pfeife von 16′ giebt den tiefsten Ton, welcher in der Musik noch gebräuchlich ist. Nach dem Obigen ist also in diesem Falle die Länge der Röhre $^1/_4$ von der Wellenlänge des Tones; die letztere selbst also gleich 64′. . Da sich der Schall in 1 Secunde durch 1050′ fortpflanzt, so giebt $\frac{1050}{64} = 16$ die Zahl der Wellenlängen, um welche dieser tiefste Ton in 1 Secunde fortschreitet oder auch die Zahl der Schwingungen, welche in 1 Secunde vollbracht werden müssen, um ihn zu erzeugen.

Eine beiderseits offene Pfeife giebt ihren tiefsten Ton, wenn ihre Länge halb so groß ist als die Wellenlänge des einfallenden Tones, welcher die Luftsäule zum Selbsttönen bringt. Dieser Ton ist also die Octave des tiefsten Tones, welchen eine gedeckte Pfeife von derselben Länge hören läßt, da seine Schwingungszahl doppelt so groß ist. Eine offene und eine gedeckte Pfeife geben mithin nur dann denselben Ton, wenn erstere doppelt so lang ist.

Wenn eine offene Pfeife ihren tiefsten Ton giebt, hat sie in ihrer Mitte einen Schwingungsknoten, während sich die Luft auf bei-

Digitized by Google

den Seiten desselben abwechselnd zu ihm hin und von ihm hinweg bewegt, so daß in der Mitte von ½ Oscillation zur anderen das Maximum der Verdichtung der Luft mit dem Maximum ihrer Verdünnung wechselt. Den nächst höheren Ton giebt dieselbe Röhre, wenn sich in ihr zwei Schwingungsknoten bilden, welche um ¼ ihrer Länge von den Enden abstehen. Der nun folgende höhere Ton erzeugt sich bei drei Schwingungsknoten, von denen einer in der Mitte liegt, während jeder der beiden anderen um ⅙ der Pfeifenlänge vom Ende absteht. Bezeichnet man den Grundton durch 1, so befolgen die nächst höheren Töne, welche eine offene Pfeife geben kann, die Reihe der natürlichen Zahlen 2, 3, 4, 5, 6, ...

Um die Schwingungsknoten einer Luftsäule durch den Versuch nachzuweisen, bedient man sich nach Hopkins zweckmäßig einer Glasröhre von ungefähr 1½ Zoll im Durchmesser und 2 Fuß Länge, welche man vertical befestigt. Nahe unter ihr wird eine Glas- oder Metallplatte durch Anstreichen zum Tönen gebracht und so auch die eingeschlossene Luftsäule in Schwingungen versetzt. Dann läßt man einen mit einer zarten Membran überzogenen Metallrahmen mittelst eines Fadens in die Röhre hinab. Ist nun die Membran mit Sand bestreut, so wird dieser an der Stelle eines Schwingungsknotens ruhig liegen bleiben, während er an allen anderen Stellen mehr oder weniger heftig abgeworfen wird.

145. Wir haben schon bemerkt, daß alle Blasinstrumente, wie auch die Orgelpfeife, durch stehende Schwingungen zum Tönen gebracht werden. Den Längendurchschnitt einer sogenannten Flöten-Orgelpfeife zeigt nebenstehende Figur. Sie besteht, wie man sieht, aus dem unteren kegelförmigen Theile, welcher den Wind liefert, und aus der eigentlichen Röhre oder Pfeife a. Jener oder der Fuß der Pfeife ist oben durch eine Platte bis auf einen feinen Spalt geschlossen; auch sind hier der obere Rand des Fußes und der untere Rand der Pfeife, etwas einwärts gebogen, so daß sie gleichsam die Lippen des Einschnittes bilden, welcher sich zwischen ihnen befindet und der Mund der Orgelpfeife genannt wird. Die Luft wird mittelst eines Blasbalges in den Fuß der Röhre geblasen; indem sie nun als ein schmaler Luftstrom aus dem Mundloche hervortritt, bricht sie sich gegen die obere Lippe und bringt so die Luft in der Röhre zum Vibriren. Die Töne, welche auf diese Weise eine Orgelpfeife giebt, entsprechen den oben angeführten Gesetzen. Die tiefsten Töne entstehen bei schwächerem, die höheren aber

Digitized by Google

bei ſtärkerem Winde. Auch ſind nach dem Obigen die Töne um ſo höher, je kürzer die Pfeife iſt.

Um bei Blasinſtrumenten eine größere Mannichfaltigkeit von Tönen hervorzubringen, gebraucht man bei manchen, wie z. B. bei dem Waldhorne und der Trompete, verſchiedene Aufſätze (Mundſtücke) oder einen verſchiebbaren Theil, wie bei der Poſaune. Bei anderen, ſo bei den Flöten und dem Klapphorne, wird die Länge der ſchwingenden Luftſäule durch Oeffnen und Schließen von Löchern verändert. Auch läßt ſich durch Verengung der Mündung der Röhre der Ton mehr oder weniger verändern, wie wir dies namentlich bei dem Waldhorne beobachten können.

Auf die Verſchiedenheit der Töne in Röhren ſind namentlich von Einfluß die Verſchiedenheit des Anblaſens, die Größe und Stellung des Mundlochs und die Dimenſionen der Röhre.

Schon durch verſchiedenes Anblaſen, je nachdem es ſtärker oder ſchwächer geſchieht, läßt ſich eine große Mannichfaltigkeit von Tönen hervorbringen. Doch hat nach Savart's Verſuchen die Richtung des Luftſtromes bei prismatiſchen Röhren keinen Einfluß auf den Ton. Was die Größe und Stellung des Mundlochs anbelangt, ſo erhält man bei einem weiten Mundloche im Allgemeinen tiefere Töne als bei einem weniger weiten, während ein breites Mundloch einen höheren Ton giebt als ein ſchmales. Aus dem letzteren Grunde bringt man bei Orgelpfeifen zu beiden Seiten des Mundlochs Bleiplatten an, welche ſich, um die Pfeife zu ſtimmen, leicht einander nähern und von einander entfernen laſſen.

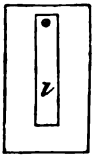
Iſt die Länge einer Röhre in Beziehung auf ihren Durchmeſſer ſehr groß, ſo ſtehen nach dem Früheren die Tonhöhen mit der Länge im umgekehrten Verhältniſſe, was nicht mehr der Fall iſt, wenn die übrigen Dimenſionen bedeutender ſind. Nach Savart laſſen parallelopipediſche Pfeifen, bei denen die Breite des Mundlochs einer Seite des Querſchnittes gleich iſt, denſelben Ton hören, wenn die auf der Linie des Mundlochs ſenkrechten Schnitte gleichen Flächeninhalt haben. Bei ähnlichen Röhren mit ähnlichen Mundlöchern verhalten ſich die Schwingungszahlen wie die entſprechenden Dimenſionen der Röhren.

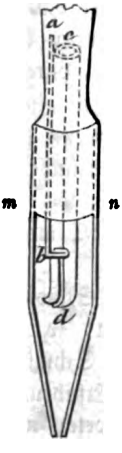
Obgleich die Töne, welche Röhren geben, durch ſtehende Schwingungen der eingeſchloſſenen Luftſäule hervorgebracht werden, ſo iſt doch die Materie der Wände von großem Einfluſſe auf jene Schwingungen und ſomit auf die Töne ſelbſt. Dies zeigt die Erfahrung zur Genüge an verſchiedenen Blasinſtrumenten (Horn, Trompete), wie

Digitized by Google

auch an Orgelpfeifen. Savart hat hierüber viele Verſuche mit Röhren von mehr oder weniger geſpanntem Pergamente und von mehr oder weniger feuchtem Papiere angeſtellt. Vermindert man die Spannung der Wände, ſo wird der Ton herabgeſtimmt, und dies um ſo mehr, je kürzer die Röhren ſind. Ueberhaupt wird der Ton um ſo tiefer, je geringer die Spannung der Wände iſt.

146. Die Töne der Zungenpfeife werden durch die Schwingungen zweier Körper hervorgebracht, nämlich einer Luftſäule und einer elaſtiſchen Platte, welche man Zunge nennt. Die letztere zeigt in ihrer einfachſten Geſtalt nebenſtehende Figur. Eine einige Millimeter dicke Platte von Zink oder Kupfer hat eine viereckige Oeffnung, über welcher eine dünne elaſtiſche Metallplatte l mit einem Ende befeſtigt iſt. Verſetzt man nun die Zunge in Schwingungen, ſo ſtreift ſie während derſelben mit ihren freien Enden an den Rändern der Oeffnung vorbei. Die Töne, welche hierdurch hervorgebracht werden, hängen von der Elaſticität und den Dimenſionen des Plättchens ab. Um die Zunge vibriren zu machen, kann man einfach die größere Platte der Länge nach auf die Lippen legen und dann ſo blaſen, daß der Luftſtrom gegen das freie Ende der Zunge gerichtet iſt. Da die Oeffnung während des Schwingens der Zunge abwechſelnd geöffnet und verſchloſſen wird, ſo muß die Luft bald freier ausſtrömen, bald in ihrer Bewegung gehemmt werden. Dieſes Zungenwerk kann nun auch mit einer Röhre in Verbindung gebracht werden, wo dann der Ton nicht allein von den Schwingungen der Zunge, ſondern auch und zwar vorzugsweiſe von denen der Luftſäule abhängt.





Bei der eigentlichen Zungen- oder Rohrwerkpfeife geht, wie die Figur zeigt, durch den Stopfen mn, welcher ſich in einem hohlen Stiefel befindet, eine Rinne cd von prismatiſcher oder halbcylindriſcher Form. Dieſe Rinne iſt der Länge nach durch ein elaſtiſches Metallplättchen verſchloſſen, welches vermittelſt eines Luftſtromes durch die untere Oeffnung des Stiefels in Vibration verſetzt wird. Durch einen verſchiebbaren Draht ab, welcher ebenfalls durch den Stopfen geht, unten doppelt umgebogen iſt und ſeiner ganzen Breite nach auf die Zunge drückt, kann die Länge des ſchwingenden Theiles der Zunge vergrößert und verkleinert werden. Der Luftſtrom kann durch einen Blasbalg oder auch einfach vermittelſt des Mundes in den Stiefel getrieben werden. Die

Digitized by Google

Schwingungen der Zunge werden hier gar sehr durch die der Luftsäule in der oben aufgesetzten Röhre bedingt, so daß beide, Zunge und Luftsäule, nur ein schwingendes System bilden.

147. Je größer die Expansivkraft der Luft im Vergleiche zu ihrer Dichtigkeit ist, desto höher ist unter sonst gleichen Umständen auch der Ton, welchen eine Pfeife giebt, wie sich dies schon aus dem, was wir im §. 130 über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft gesagt haben, schließen läßt. So muß auch der Ton einer Pfeife in warmer Luft höher sein als in kalter; auch findet man bei Blasinstrumenten, daß sich der Ton während des Anblasens mit dem Munde erhöht. Aus demselben Grunde giebt eine mit Wasserstoffgas gefüllte Röhre einen höheren Ton als eine solche, welche atmosphärische Luft enthält. Füllt man ein und dieselbe Pfeife nach einander mit verschiedenen Gasarten, so läßt sich aus der Höhe des Grundtones, welchen sie für jedes Gas giebt, auf die Anzahl der Schwingungen während 1 Secunde und hiermit auch auf das Verhältniß der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Schalles in diesen verschiedenen Gasen schließen. Doch hat man dabei nach dem Obigen genau auf die Temperatur jedes einzelnen Gases Rücksicht zu nehmen.

Auch ist uns hier nach Chladni und Savart ein neues Mittel gegeben, um die Schallgeschwindigkeit in einem festen Körper zu bestimmen.

Bezeichnet man nämlich zu diesem Ende die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft durch c, die Länge einer offenen Pfeife durch l und die Anzahl der Schwingungen, welche die eingeschlossene Luftsäule in 1 Secunde macht, durch n; so ist die Länge der Schallwelle, die in diesem Falle erzeugt wird, nach dem Früheren gleich 2 l. Demnach bilden die n Schwingungen, welche in 1 Secunde hervorgebracht werden, eine Länge $= 2nl$, die der Schallgeschwindigkeit gleich sein muß; also $c = 2nl$.

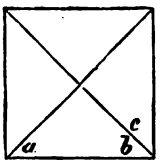
Man bezeichne ebenso die Schallgeschwindigkeit in irgend einem festen Körper durch c', die Länge eines aus diesem Körper verfertigten prismatischen oder cylindrischen Stabes wieder durch l. Dieser Stab schwinge nun im longitudinalen Sinne und es sei, dies vorausgesetzt, n' die Anzahl der Schwingungen, welche er macht, falls er seinen Grundton giebt, welches bekanntlich geschieht, wenn er an beiden Enden frei ist und in der Mitte gehalten wird. Dann erzeugt sich in der Masse des Stabes eine Welle, deren Länge 2 l ist, und die n Schwingungen, welche er in 1 Secunde vollendet, bilden eine Länge $2n'l$, die der Schallgeschwindigkeit c' in diesem Körper

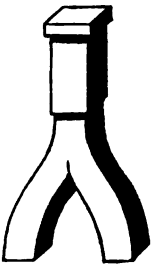
Digitized by Google

gleich ist. Demnach haben wir $c' = 2n'l$. Dividirt man diese Gleichung durch die obige, so erhält man $c' = c\frac{n'}{n}$. Nach dieser Formel läßt sich nun die Geschwindigkeit des Schalles in irgend einem festen Körper berechnen, wozu nur nöthig ist, daß man den Grundton, welchen ein aus diesem Körper verfertigter Stab hervorbringt, mit dem Grundtone einer gleich langen offenen Pfeife vergleicht.

148. Es kann vorkommen, daß in einer und derselben Luftsäule sich zwei verschiedene Schwingungsarten fortpflanzen, welche sich dann unter einander verstärken oder schwächen werden, je nachdem die zusammentreffenden Wellenstücke sich in gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden.

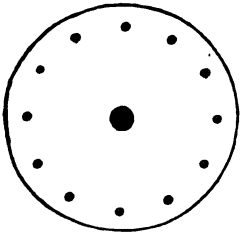
Um in dieser Hinsicht bequem Versuche anstellen zu können, bedient man sich einer Röhre von Holz oder Pappe, welche sich unten in zwei gleich lange offene Arme theilt und an deren oberem Ende sich eine zweite Röhre auf- und abschieben läßt, die oben mit einer Membran verschlossen ist. Die andere Figur stellt eine Platte vor, welche auf bekannte Weise in Vibration versetzt wird. Streicht man z. B. mit einem Fiedelbogen in der Mitte einer Kante, so entstehen die angegebenen Knotenlinien und je zwei an einander grenzende, durch eine Knotenlinie getrennte Partien der Platte schwingen nach entgegengesetzten Richtungen. So schwingen die Stellen a und b einer Abtheilung immer in demselben Sinne, während a und c sich in entgegengesetzten Richtungen bewegen. Hält man nun die Schenkel der Röhre über die Stellen a und b, so wird der auf die Membran gestreute Sand in sehr lebhafte Bewegung gerathen; denn da sich a und b stets in gleichen Schwingungszuständen befinden, so gelangen von beiden gleichzeitig Verdichtungen und Verdünnungen durch die Schenkel in den oberen Theil der Röhre, wo sie sich gegenseitig verstärken müssen. Bringt man aber einen Schenkel über b und den anderen über c, so tritt wegen des entgegengesetzten Schwingungszustandes dieser Stellen in dem einen Schenkel eine Verdichtung und gleichzeitig in dem anderen eine Verdünnung der Luft ein, so daß sich beide in dem oberen Theile der Röhre gegenseitig aufheben. Deshalb bleibt auch der Sand auf der Membran in Ruhe.





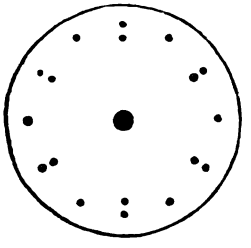
Digitized by Google

Nach Seebeck laſſen ſich über dieſe Erſcheinungen, welche man Interferenzerſcheinungen nennt, wichtige Verſuche mittelſt eines Apparates anſtellen, der aus einer hölzernen, mit Blei beſchwerten und um eine horizontale Axe drehbaren Scheibe beſteht. Auf dieſer Scheibe wird concentriſch eine größere Scheibe von dünnem, glattem Papier befeſtigt, an deren Umfang in gleichen Abſtänden Löcher durchgeſchlagen werden. Die Axe läßt ſich mittelſt eines Wellrades und Schnurlaufes in Bewegung ſetzen. Dieſer Apparat kann nun während der Drehung entweder dadurch zum Tönen gebracht werden, daß man vermittelſt einer Röhre einen Luftſtrom gegen die Löcher bläſt, oder auch, wenn man eine aus einem Kartenblatte geſchnittene Spitze ſo gegen die Scheibe hält, daß ſie in die Löcher einſchlagen muß.



Läßt man durch zwei Röhren von entgegengeſetzten Seiten her zwei Luftſtröme gegen die Löcher wirken, in der Art, daß die Röhren während der Umdrehung der Scheibe gleichzeitig zwei verſchiedenen Löchern gegenüber ſtehen, ſo hört man keinen Ton, ſondern nur ein Sauſen, wiewohl jeder einzelne Luftſtrom, wenn er allein wirkſam iſt, deutlich ein und denſelben Ton hervorbringt. In jenem Falle heben ſich nämlich die beiden entgegengeſetzten Luftſtröme während ihrer Fortpflanzung und alſo auch im Ohre des Beobachters gegenſeitig auf. Werden die Löcher von den entgegengeſetzten Luftſtrömungen nicht gleichzeitig, ſondern alternirend getroffen, ſo hört man den urſprünglichen Ton verſtärkt.

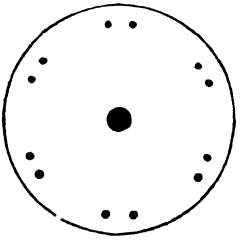
Wenn ſich in der Scheibe zwei concentriſche Luftreihen befinden, von denen die eine doppelt ſo viele Löcher hat als die andere, wie in nebenſtehender Figur, ſo hört man beim gleichzeitigen Anblaſen beider Löcherreihen von derſelben Seite her zwei Töne, deren einer die Octave des anderen iſt. Geſchieht aber das Anblaſen von entgegengeſetzten Seiten her, dergeſtalt, daß jeder Luftſtoß des tieferen Tones mit einem des höheren Tones zuſammentrifft, ſo verſchwindet der höhere Ton und der tiefere wird allein gehört. Hier wird der Luftſtoß, welcher durch ein Loch der inneren Reihe hervorgebracht wird, durch den entgegengeſetzten des gleichzeitig angeblaſenen Loches der äußeren Reihe aufgehoben, ſo daß die Hälfte



Digitized by Google

der Luftstöße der äußeren Löcherreihe ohne Wirkung bleibt und derselbe Ton gehört wird, als wenn nur die andere Hälfte der äußeren Löcher vorhanden wäre. Dieser Ton ist also die nächst tiefere Octave des allen äußeren Löchern entsprechenden Tones.

Eine eigenthümliche Erscheinung bietet der Fall dar, wenn die Löcher nicht gleich weit von einander entfernt sind, sondern immer ein größerer Zwischenraum mit einem kleineren abwechselt, doch so, daß alle kleineren Zwischenräume unter sich und alle größeren unter sich gleich sind. Bläst man nun einen Luftstrom gegen die Scheibe, während sie umgedreht wird, so hört man einen solchen Ton, als ob nur halb so viele Löcher da wären. Es scheinen sich hier die beiden in kürzeren Zwischenräumen auf einander folgenden Luftstöße zu einem einzigen zu vereinigen, und das um so mehr, je bedeutender der Unterschied der größeren und kleineren Zwischenräume ist. Ist dagegen die Differenz dieser Zwischenräume weniger ungleich, so hört man neben jenem Tone auch seine nächst höhere Octave, welche der Gleichheit aller Zwischenräume entspricht.



149. Zu den Interferenzerscheinungen gehört auch das sogenannte Schweben der Töne, ein periodisch abwechselndes Anschwellen und Nachlassen derselben, welches stattfindet, wenn zwei nicht ganz isochrone Töne zu unserem Ohre gelangen. Diese Töne verstärken und schwächen sich abwechselnd, da bald Verdichtungen mit Verdichtungen, bald Verdünnungen mit Verdünnungen zusammentreffen; sobald aber eine Verdichtung des einen Tones mit einer Verdünnung des anderen zusammenkommt, heben sich beide gegenseitig auf. Diese periodisch zum Bewußtsein kommenden Schwebungen der Töne nennt man nach Scheibler auch Stöße. Die Stöße folgen um so langsamer auf einander, je näher die beiden Töne einander liegen. Je ungleicher aber die Töne werden, desto rascher folgen die Stöße, so daß sie sich zuletzt zu einem Tone vereinigen, den man Combinationston nennt. Wenn man z. B. einen Ton und seine Octave gleichzeitig ertönen läßt, so hört man seine nächst tiefere Octave, was leicht einzusehen ist. In der beigegebenen Figur mögen die Punkte

Digitized by Google

der mittleren Reihe die auf einander folgenden Verdichtungsstöße darstellen, welche irgend einen Ton erzeugen. Dann stellen die Punkte der oberen Reihe die Verdichtungsstöße der Quinte von diesem Tone dar, da die Schwingungszahlen des Grundtones und der Quinte im Verhältnisse von 2 : 3 stehen. Man sieht nun aber, daß der zweite Stoß der mittleren Reihe stets mit einem Stoße der oberen Reihe zusammenfällt. Auf diese Weise entstehen die verstärkten Stöße in solchen Intervallen, wie die untere Reihe zeigt, welche also die nächst tiefere Octave des Grundtones angiebt.

Die erwähnten Stöße vernimmt man deutlich bei zwei Orgelpfeifen, deren Töne einer reinen Consonanz sehr nahe stehen, oder auch bei zwei Stimmgabeln unter ähnlichen Verhältnissen.

Drittes Kapitel.

Einige nähere Betrachtungen über den Schall als solchen und über die Mittheilung der Schwingungsbewegung zwischen verschiedenartigen Körpern.

150. Der Schall, dessen Entstehung und Fortpflanzung wir bisher betrachtet haben, hat verschiedene Bezeichnungen erhalten, je nachdem er in qualitativer oder quantitativer Hinsicht eine Eigenthümlichkeit darbietet. Man nennt ihn einen **Knall**, wenn er nicht durch regelmäßige Schwingungen eines Körpers erzeugt und durch eine regelmäßige Wellenbewegung fortgepflanzt wird. So entsteht ein Knall durch einen plötzlichen, nicht wiederkehrenden Stoß oder Schlag auf einen Körper, durch eine plötzliche Verdichtung der Luft, wie sie z. B. eine Explosion hervorbringt. Eine solche Verdichtung verbreitet sich, ohne daß weitere regelmäßige Wellen nachfolgen. Auf einer unregelmäßigen Wellenbewegung beruht auch das, was man **Geräusch** nennt.

Das sogenannte Qualitative des Schalles oder auch sein **Klang** liegt in dem, wodurch sich der Ton eines Instrumentes von dem eines anderen bei gleicher Höhe oder wodurch sich die menschliche Stimme von einem musikalischen Tone unterscheidet. Nach **Euler** hängt der Klang eines Tones von dem Gesetze ab, welches die Geschwindigkeiten der einzelnen Theilchen des tönenden Körpers während einer Schwingung befolgen.

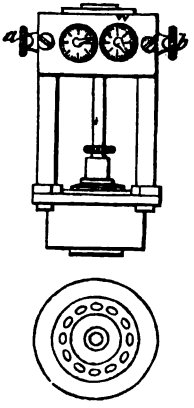
151. Ein Ton kann höher oder tiefer sein; auch wissen wir, daß ein Ton um so höher ist, je kleiner die Schwingungsdauer der

Digitized by Google

Theilchen des Körpers ist, welcher ihn erzeugt, und je kürzer die Luftwellen sind, welche ihn fortpflanzen.

Um nun die absolute Anzahl der in einer gegebenen Zeit vollführten Schwingungen, durch welche ein Ton hervorgebracht wird, genau zu bestimmen, bedient man sich zweckmäßig eines Apparates von Cagniard la Tour, welcher unter dem Namen der Sirene bekannt ist und dessen einfachste Form wir im §. 148 bei Gelegenheit der Interferenzerscheinungen kennen gelernt haben.

Die Sirene besteht nun aus einer Röhre, welche zu einer cylindrischen Büchse führt, die oben mit einer wohlgeebneten kreisförmigen Platte geschlossen ist. Diese Platte enthält in kreisförmiger Anordnung eine Reihe Löcher, durch welche die Luft, die man in die Röhre bläst, entweichen kann. Ueber der genannten Platte befindet sich in geringem Abstande eine zweite mit ihr parallele, welche um eine senkrechte Are leicht drehbar ist und gleichfalls Löcher enthält, die zwar denen der ersten Platte genau entsprechen, aber gegen ihre Ebene geneigt sind. Dieser letztere Umstand bringt es mit sich, daß ein Luftstrom, welcher aus den Oeffnungen der unteren Platte hervortritt, die zweite in eine mehr oder weniger rasche rotirende Bewegung versetzt. Die genannte Rotationsaxe trägt an ihrem oberen Theile eine Schraube ohne Ende, welche in ein Rad von etwa 100 Zähnen eingreift. Neben diesem Rade befindet sich auf der anderen Seite der Rotationsaxe ein zweites Rad, das aber nur eine Umdrehung in derselben Zeit macht, in welcher das erste 100 vollbringt, indem es von einem an der Axe des letzterwähnten Rades befestigten Arme bei jeder Umdrehung um einen Zahn weiter geschoben wird. An den Axen dieser Räder befinden sich Zeiger, welche die in der Figur sichtbaren getheilten Kreise durchlaufen. Um das Räderwerk nach Belieben in Thätigkeit setzen oder hemmen zu können, stehen von außen zwei Knöpfe a und b mit demselben in Verbindung. Durch einen Druck auf a wird das erst erwähnte Rad zum Eingreifen in die Schraube ohne Ende veranlaßt, durch einen Druck auf b aber sogleich zum Stillstande gebracht.



Während einer Umdrehung der oberen Platte fällt eine jede ihrer Oeffnungen einmal auf jede Oeffnung der unteren Platte, so daß also bei einer Umdrehung jedes Loch der ersten Platte so vielmal ge-

Digitized by Google

öffnet und geschlossen wird, als Löcher in der unteren Platte enthalten sind. Eben so vielmal wird also auch der Luftstrom aus der Röhre frei durchgelassen und gehemmt, was eben so viele Verdichtungen und nachfolgende Verdünnungen der Luft oder vollständige Schallwellen hervorbringt.

Will man nun mittelst der Sirene die Schwingungszahl eines Tones bestimmen, so führe man durch die untere Röhre einen Luftstrom und regulire denselben so lange, bis der Ton der Sirene mit dem gegebenen im Einklange ist. Um einen regelmäßigen Luftstrom zu liefern, gebraucht man am zweckmäßigsten einen Blasbalg, welcher die Luft durch eine Röhre in einen Kasten treibt, der in seiner oberen Fläche eine Reihe von Löchern hat, welche durch Ventile geschlossen sind und mittelst Tasten geöffnet werden können. Auf diesen Windkasten setzt man eine offene oder geschlossene Röhre, welche mit einer Stimmgabel im Einklange ist, und neben sie auch die Sirene. Sobald nun durch gehörige Regulirung des Luftstromes vom Blasbalge aus Sirene und Röhre im Einklange sind, drückt man am Knopfe des Räderwerks, damit die Schraube ohne Ende in das gezähnte Rad eingreift, und beobachtet gleichzeitig an einem Chronometer die Zeit. Nach einigen Minuten wird die Bewegung des Räderwerks eingestellt. Durch die Zeiger erfährt man die Anzahl der Umdrehungen der Platte, sowie die Zahl der Schwingungen in der durch das Chronometer gegebenen Zeit, woraus sich leicht die Schwingungszahl für 1 Secunde berechnen läßt.

Nach Savart kann man auch durch ein gezahntes Rad die Schwingungszahl eines Tones bestimmen. Innerhalb eines starken Gestelles von Eichenholz, welches noch auf dem Boden befestigt ist, befindet sich ein gezahntes Metallrad, welches um eine horizontale Are drehbar ist. Von der Welle dieser Are geht eine Schnur ohne Ende über den Umfang eines größeren Rades, welches in demselben Gestelle vermittelst einer Kurbel um eine starke Are gedreht werden kann, wodurch denn auch das gezahnte Rad in eine rasche Rotationsbewegung versetzt wird. Während aber das größere Rad eine Umdrehung macht, läuft die Welle des gezahnten 10 Mal um. In der Nähe des letzteren ist am Gestelle ein Plättchen so befestigt, daß eine seiner Kanten während der Rotation dem Stoße der Zähne ausgesetzt ist. Jeder Zahn hebt beim Vorübergehen das Plättchen in die Höhe, welches aber wegen seiner Elasticität wieder zurückgeht, ehe es vom folgenden Zahne berührt wird, so daß jeder Zahn einen Hin- und Hergang oder eine Schwingung des Plättchens hervorbringt. Der

Digitized by Google

Ton, welcher auf dieſe Weiſe erzeugt wird, hängt hinſichtlich ſeiner Höhe von der Geſchwindigkeit der Umdrehung ab. Weiß man aber, wie viele Zähne in einer gegebenen Zeit am Plättchen vorübergehen, ſo kennt man auch die Schwingungszahl des erzeugten Tones. Dieſer Apparat giebt mit dem vorhergehenden, der Sirene, übereinſtimmende Reſultate.

Wendet man ein Rad an, deſſen Umfang 600 Zähne trägt, ſo gehen in 1 Secunde 24000 Zähne am Plättchen vorüber, ſofern das Rad in 1 Secunde 40 Umdrehungen macht. Auf dieſe Weiſe erhielt Savart einen Ton, der durch 24000 Schwingungen in der Secunde erzeugt wurde und ungeachtet ſeiner außerordentlichen Feinheit noch deutlich hörbar war.

Wir wiſſen, daß der tiefſte Ton, welcher in der Muſik gebräuchlich iſt, durch 16 Schwingungen in der Secunde erzeugt wird. Nach Savart laſſen ſich aber noch tiefere Töne hervorbringen, wenn man einen maſſiven Stab, welcher um eine durch ſeine Mitte gehende Axe rotiren kann, während der Rotation zwiſchen zwei Holzplatten, die eine Art Spalte bilden, hindurchgehen läßt. Man erhält hierdurch ein ſehr intenſives, einem Knalle ähnliches Geräuſch. Geſchieht aber die Rotation ſo ſchnell, daß 7 bis 8 Durchgänge und mithin eben ſo viele Luftſtöße während 1 Secunde erfolgen, ſo vernimmt man einen continuirlichen Ton von ungewöhnlicher Stärke und Tiefe.

Hiernach können wir alſo alle Töne vernehmen, welche durch 7 — 24000 Schwingungen in der Secunde hervorgebracht werden, ohne daß man behaupten kann, dies ſeien die wirklichen Grenzen der Wahrnehmbarkeit.

152. Während die Tonhöhe durch die Schwingungsdauer oder durch die Anzahl der Schwingungen in der Zeiteinheit bedingt iſt, hängt die Intenſität oder Stärke des Tones von der Schwingungsweite der Theilchen ab. Je größer dieſe iſt, deſto ſtärker ſind auch die abwechſelnden Verdichtungen und Verdünnungen der Luftwellen, welche den Ton fortpflanzen. Daher muß auch die Intenſität des Schalls mit der Dichtigkeit der Luft zunehmen.

Da ſich eine Welle in der freien Luft ſphäriſch ausbreitet, ſo muß die Stärke des Schalls mit dem Quadrate der Entfernung vom Mittelpunkte der Erſchütterung abnehmen. Verhindert man nun eine derartige Ausbreitung des Schalls dadurch, daß man ihn durch glatte Röhren gehen läßt, ſo kann er ohne merkliche Abnahme ſehr weit fortgepflanzt werden. Hierauf beruht die Wirkung des ſogenannten Communicationsrohres, einer mehr oder weniger langen cylin-

Digitized by Google

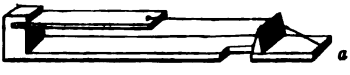
drischen Röhre, sowie auch mit Rücksicht auf die Gesetze der Reflexion die Wirkung des Sprach- und Hörrohres. Das Sprachrohr ist eine conische Röhre, in welcher die Schallwellen an der engeren Oeffnung erregt werden, das Hörrohr eine kurze, trichterförmige, meist gebogene Röhre, deren engere Oeffnung vor das Ohr gehalten wird, während die weitere den Schall aufnimmt. —

Es kann vorkommen, daß die Luft von einem vibrirenden Körper aus an einigen Stellen stärker als an anderen erschüttert wird. Dann finden sich rings um den tönenden Körper bei gleicher Entfernung von ihm Stellen, in denen der Ton schwächer als in anderen vernommen wird, ja selbst solche, wo er ganz verschwindet. Man kann diese Erscheinung leicht hervorbringen, wenn man einen Stab durch einen Schlag der Quere nach in Vibration versetzt und ihn dann vor dem Ohre um seine Axe dreht. Durch einen Versuch mit der Stimmgabel hat W. Weber rings um dieselbe vier Flächen von hyperbolischer Krümmung bestimmt, in denen kein Ton vernommen wird.

153. Wir haben bei unseren früheren Betrachtungen bemerkt, daß fast alle Körper in stehende Schwingungen versetzt werden können. Kommt nun ein vibrirender Körper mit anderen in Berührung, so pflanzt sich auch in ihnen der schwingende Zustand fort, und da von dem Ganzen dieser Körper eine theilweise Reflexion der Vibrationen stattfindet, so müssen auch in ihnen durch Interferenz des directen und reflectirten Wellensystems stehende Schwingungen entstehen, welche den Schall des ursprünglich tönenden Körpers verstärken. Alle Körper bilden nun ein System, dessen Vibrationen mit einander zusammen stimmen, wenn sie schon in den einzelnen Theilen auf verschiedene Weise vor sich gehen.

Savart hat mittelst des folgenden Apparates belehrende Versuche über die Mittheilung der Schwingungen von einem festen Körper zum anderen angestellt.

Mit einem länglichen Holzbrettchen, welches durch die in der Figur angedeutete Weise befestigt ist, steht eine Violinsaite in Verbindung, die bei a durch einen Schlüssel mehr oder weniger gespannt werden kann. Bringt man die Saite durch Streichen mit einem Fiedelbogen zum Tönen, so geräth auch das Brettchen in Schwingungen, deren Natur aus den Knotenlinien, welche aufgestreuter Sand bildet, geschlossen werden kann. Streicht man unter verschiedenen Neigungen gegen die Oberfläche des Brettchens, so gewahrt man



Digitized by Google

auch verſchiedene Knotenlinien, ohne daß die Tonhöhe unter ſonſt gleichen Umſtänden verändert wird. Wird die Saite parallel mit der Oberfläche des Brettchens geſtrichen und dadurch in longitudinale Schwingungen verſetzt, ſo zeigt die Bewegung des Sandes, daß auch die Theile des Brettchens im longitudinalen Sinne ſchwingen. Dabei zeigen die Knotenlinien eine Geſtalt, wie ſie dieſer Schwingungsart zukommt. Mit der Neigung des Bogens ändert ſich die Geſtalt der Knotenlinie, und wenn die Saite bei ſenkrechter Richtung des Bogens gegen die Oberfläche des Brettchens geſtrichen wird, ſo zeigen die Theilchen des letzteren gleich denen der Saite Schwingungen, welchen die Geſtalt der Knotenlinien entſpricht. Hieraus folgt alſo, daß die Theilchen des Brettchens ſucceſſiv dieſelbe Bewegung annehmen, welche den Theilchen der Saite zukommt.

Man verbinde zwei Scheiben von gleichen Dimenſionen und ſonſt gleicher Beſchaffenheit durch einen in ihrer Mitte und ſenkrecht auf ihrer Ebene befeſtigten Stab. Man halte das Ganze ſo, daß die Scheiben eine horizontale Lage erhalten und beſtreue ſie mit trocknem, feinem Sande. Verſetzt man nun eine dieſer Scheiben durch Streichen mit einem Fiedelbogen in transverſale Schwingungen, ſo erzeugt ſich mittelſt des Stabes auch in der anderen dieſelbe Schwingungsart, da der aufgeſtreute Sand Knotenlinien verräth, welche denen der unmittelbar erſchütterten Scheibe entſprechen. Die Transverſalſchwingungen der letzteren Scheibe geſchehen nämlich im Sinne der Länge des auf ihr ſenkrechten Stabes, weshalb dieſer von der Scheibe aus in Längenſchwingungen verſetzt wird, welche hinſichtlich der Scheibe in der Richtung ihrer Dicke vor ſich gehen und folglich die Theilchen der anderen Scheibe in Transverſalſchwingungen verſetzen müſſen. Daſſelbe Reſultat erhält man, wenn man auf einen Glasſtreifen ſenkrecht einen zweiten befeſtigt, auf dieſen wieder einen mit dem erſten parallelen u. ſ. f. Verſetzt man den unterſten Streifen in Vibration, ſo nehmen auch alle mit ihm parallelen dieſelbe Schwingungsweiſe an, während die ſenkrechten im entgegengeſetzten Sinne ſchwingen. Bewegen ſich alſo die parallelen Streifen transverſal, ſo ſchwingen die ſenkrechten longitudinal, und ſo umgekehrt.

Dieſe ſucceſſiven Umwandelungen der ſchwingenden Bewegung geſchehen mit der vollkommenſten Regelmäßigkeit. Alle parallelen Streifen, wenn ſie von gleichen Dimenſionen ſind, zeigen dieſelben Knotenlinien, eben ſo alle ſenkrechten unter ſich. Bei Longitudinalſchwingungen zeigen bekanntlich Streifen auf ihren beiden Flächen eine verſchiedene Anordnung der Knotenlinien, was auch hier der Fall iſt,

Digitized by Google

indem die einander zugewandten Seiten je zweier longitudinal schwingenden Streifen übereinstimmende, die einander abgewandten aber verschiedene zeigen. —

Wenn ein Körper mit einem anderen von so bedeutender Masse verbunden wird, daß er den Ton, welcher letzterem eigenthümlich ist, nicht merklich abzuändern vermag, so nehmen seine Theilchen Schwingungen an, welche mit den zu jenem Tone gehörigen isochronisch sind.

154. Aus früheren Betrachtungen ist uns bekannt, daß der Ton eines festen Körpers bedeutend verstärkt werden kann, wenn man den Körper vor eine Röhre von passender Länge hält, indem dadurch die Luft in Folge stehender Schwingungen zum Mittönen gebracht wird.

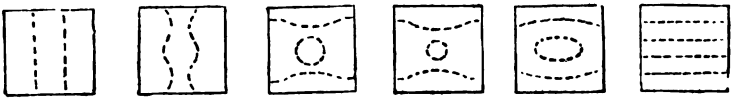
Dasselbe kann aber auch geschehen, wenn man den vibrirenden, aber schwach tönenden Körper mit einem anderen in Berührung bringt, dessen Theilchen leicht in Schwingungen zu versetzen sind. In dem letzteren bilden sich dann, wie wir wissen, gleichfalls stehende Wellen, wodurch der ursprüngliche Ton verstärkt und leichter der Luft mitgetheilt wird. Eine stark angeschlagene Stimmgabel z. B. giebt, wenn sie frei in der Hand gehalten wird, doch nur einen sehr schwachen Ton, welcher aber sogleich intensiv und andauernd wird, wenn man sie auf einen Kasten von dünnem, elastischem Holze setzt. Auf dem Vorstehenden beruhen die Resonanzböden der Saiteninstrumente. In Folge der Vibrationen des Resonanzbodens wird aber auch die unter ihm befindliche Luft in Schwingung versetzt, was ebenfalls auf die Verstärkung des ursprünglichen Tones von Bedeutung ist. Auch die Resonanzböden theilen sich in verschiedene schwingende Theile ab, deren Größe und Gestalt von der Gestalt des Resonanzbodens und dem Grade der Elasticität seiner verschiedenen Theile abhängt. Daher der große Einfluß des Holzes, welches zu Resonanzböden verwendet wird, auf die Güte musikalischer Instrumente.

155. Wenn Schallwellen in der Luft mit einem festen Körper in Berührung kommen, so geräth auch dieser in Schwingungen. Wenn man in der Nähe einer Saite, welche sich auf einem Instrumente befindet, eine andere in Schwingungen versetzt, so vibrirt auch jene entweder in ihrer ganzen Länge oder nach aliquoten Theilen derselben. Eben so beobachtet man bei Orgeln ein Erzittern in der Nähe befindlicher Fensterscheiben, welche auch mit einigen Pfeifen in Einklang schwingen und dadurch zur Verstärkung des ursprünglichen Tones beitragen können.

Werden Körper, welche sich leicht in Schwingung versetzen lassen, von Schallwellen in der Luft getroffen, so theilen sie sich wie selbst-

Digitized by Google

tönende Körper in einzelne oscillirende Abtheilungen mit Knotenlinien. So kann man elastische Membranen durch Schallwellen leicht in regelmäßige Schwingungen versetzen und die dabei entstehenden Knotenlinien durch aufgestreuten Sand sichtbar machen. Man braucht zu diesem Ende nur die Membran nach Savart über einen Holzrahmen oder über eine Glasglocke zu spannen und ihr dann eine schwingende Scheibe oder Stimmgabel zu nähern. Die Schwingungsart der Membran richtet sich dabei nach der Lage der Scheibe oder Stimmgabel gegen ihre Oberfläche, wie sich dies aus der Bewegung des aufgestreuten Sandes schließen läßt, wenn auch der hervorgebrachte Ton derselbe bleibt. Läßt man den anfänglichen Ton allmälig höher werden, so geht auch die Figur der Knotenlinie allmälig in eine andere über. Nachstehende Figur zeigt eine Reihe solcher allmäliger Uebergänge.



Um eine Membran in regelmäßige Schwingungen zu versetzen, kann man sie auch der Mündung einer offenen Orgelpfeife nahe bringen, wo man dann im Allgemeinen dieselben Resultate erhält.

Die auf diese Weise entstehenden Klangfiguren, welche man Resonanzfiguren nennt, unterscheiden sich oft wesentlich von denen der selbsttönenden Körper, welche wir früher betrachtet haben. Im Allgemeinen sind die Knotenlinien der Resonanzfiguren nicht so regelmäßig wie die der eigentlichen Klangfiguren; auch sind ihre Zwischenräume oder die schwingenden Abtheilungen nicht immer aliquote Theile der Größe der ganzen schwingenden Fläche. Bei den eigentlichen Klangfiguren nimmt die Höhe des Tones bekanntlich mit der Anzahl der Knotenlinien zu, während sich bei den Resonanzfiguren dieses Verhältniß nicht mehr zeigt.

Viertes Kapitel.

Stimme und Gehör.

156. Der Mechanismus der menschlichen Stimme hat seinen Hauptsitz im Kehlkopfe, welcher aus vier Knorpeln, dem Ringknorpel, dem Schildknorpel und den beiden Gießkannenknorpeln besteht. Der Kehlkopf befindet sich am oberen Ende der

Digitized by Google

Luftröhre, welche bekanntlich in der Form eines cylindrischen Kanals von knorpeligen Ringen gebildet wird, die durch biegsame, häutige Ringe mit einander verbunden sind. Die innere Wand des Kehlkopfs endigt sich oben in zwei Häuten, welche Stimmbänder genannt werden und nur eine schmale Spalte, die Stimmritze, zwischen sich lassen. Die Stimmbänder sind einer verschiedenen Spannung fähig, indem sie mit den oben angeführten Knorpeln in Verbindung stehen, welche durch zugehörige Muskeln einander genähert oder von einander entfernt werden können, wodurch auch die Stimmritze enger oder weiter wird. Ueber den Lippen der Stimmritze befinden sich die sogenannten ventriculi Morgagni, zwei sackartige Höhlungen, von denen die eine auf der rechten, die andere auf der linken Seite der Stimmritze liegt, und deren obere Ränder gleichsam eine zweite Stimmritze bilden. Ueber dieser liegt ein platter, beinahe dreieckiger Knorpel, der Kehldeckel, welcher nach vorn mit einer Seite angewachsen ist; er kann die Stimmritze bedecken, so daß Speisen und Getränke verhindert werden, in die Luftröhre zu kommen.

157. Was nun die menschliche Stimme selbst anlangt, so unterliegt es wohl keinem Zweifel, daß sie im Kehlkopfe auf ähnliche Weise zu Stande kommt wie der Ton in einer Zungenpfeife. Um die Analogie zwischen dem Stimmorgane und einer Zungenpfeife vollständig herzustellen, muß man Versuche mit membranösen, durch Spannung elastischen Zungen machen. So suchten Biot und Cagniard de la Tour die Stimmbänder durch elastische Membranen von Kautschuck zu ersetzen, indem sie dieselben über eine Röhre spannten. Auf ähnliche Weise machte Müller zahlreiche Versuche mit membranösen Zungen. Man spannt über die eine Hälfte eines kurzen Rohres einen Streifen von Kautschuck, während man die andere Hälfte mit einer festen Platte so bedeckt, daß zwischen der letzteren und dem Streifen nur eine feine Spalte bleibt. Anstatt die zweite Hälfte mit einer festen Platte zu bedecken, kann man sie aber auch zum Behufe der Bildung einer feinen Spalte wie die erste mit einem Kautschuckstreifen überziehen. Bläst man nun in die Röhre, so erhält man Töne, welche nach der Stärke des Blasens und nach dem Grade der Spannung der Membran verschieden sein können. Die wichtigsten Versuche stellte aber J. Müller mit ausgeschnittenen Kehlköpfen menschlicher Leichen an. Er befestigte solche Kehlköpfe auf schickliche Weise an einem Brettchen und gab dann den Stimmbändern durch Anziehen des Schildknorpels mittelst angehängter Gewichte eine verschiedene Spannung. Auf diese Weise bemerkte Müller,

Digitized by Google

daß die unteren Stimmbänder bei enger Stimmritze durch Anblasen von der Luftröhre aus reine und volle Töne geben, welche denen der menschlichen Stimme sehr nahe kommen. Durch vermehrte Spannung der Stimmbänder brachte er allmälig alle Töne, welche innerhalb 2½ Octave liegen, hervor. Auch fand er, daß bei gleicher Spannung der Stimmbänder die größere oder geringere Verengerung der Stimmritze keinen wesentlichen Einfluß auf die Tonhöhe hat, obschon bei weiter Stimmritze der Ton schwerer anspricht und weniger klangvoll ist. Dagegen läßt sich durch stärkeres Blasen bei gleicher Spannung der Stimmbänder der Ton bedeutend erhöhen.

Auch Beobachtungen an lebenden Menschen und Thieren haben dargethan, daß sich die Töne nur in der Stimmritze selbst bilden. Wird der Luftstrom, welcher die Stimmbänder in Schwingungen versetzt, durch ein Loch unterhalb der Stimmritze gestört, so hört die Tonbildung auf, sie wird aber sogleich wieder hergestellt, wenn man das Loch verschließt. Hingegen hindert eine Oeffnung oberhalb der Stimmritze die Bildung der Stimme nicht, wenn sie auch ihren Klang etwas verändert.

Uebrigens sind die Stimmbänder im Zustande der Ruhe schlaff und runzelig und erhalten erst durch das Blasen die zum Schwingen nöthige Spannung. Lehfeldt hat die Beobachtung gemacht, daß bei den sogenannten Falsettönen blos die feinen Ränder der Stimmritze, bei den Brusttönen hingegen die ganzen Stimmbänder lebhaft zwischen weiten Grenzen schwingen.

Die Zunge und Lippen, der Schlund und die Mundhöhle haben großen Antheil an der Articulation der menschlichen Stimme. Nach Müller's Untersuchungen haben jedoch die Länge der Luftröhre, die Mund- und Nasenhöhle, sowie der Kehldeckel keinen Einfluß auf die Höhe oder Tiefe der Töne, wohl aber auf den Klang, indem sie zu diesem durch Resonanz ihren Beitrag liefern. Auch hat Magendie beobachtet, daß der Kehldeckel bei ausgehaltenen Tönen in Schwingungen geräth.

158. Die Säugethiere, wie überhaupt alle mit Lungen versehenen Thiere, also auch die Amphibien, haben einen Stimmapparat, welcher mit dem des Menschen wenigstens im Wesentlichen übereinkommt. Verschiedene Gattungen dieser Klassen zeigen indessen mancherlei Besonderheiten. So haben die Affen eigenthümliche resonirende Theile an ihrem Stimmorgane, wie z. B. der Pavian, Mandrill, Orang-Utang einen häutigen Sack unter dem Zungenbeine. So hat auch der männliche Frosch häutige Säcke am Halse, welche beim Schwingen der Stimmbänder nach außen treten und zur Verstärkung des Tones beitragen.

Besondere Eigenheiten zeigt das Stimmorgan der Vögel, von dem

Digitized by Google

ſich nach den bis jetzt darüber angeſtellten Unterſuchungen keineswegs behaupten läßt, daß es gleich dem der Säugethiere wie eine Zungenpfeife wirke. Daſſelbe befindet ſich am unteren Theile der Luftröhre. Daher kann man ſchreienden Vögeln, wie der Elſter, Ente u. dgl. die Luftröhre durchſchneiden, ohne daß ſie deshalb am Schreien verhindert werden. Am oberen Ende zeigt ſich bei den Vögeln eine Spalte, welche zwar keinen Ton zu erzeugen vermag, aber ſich doch erweitern und verengern läßt, ſo daß ſie dem Luftſtrome einen mehr oder weniger freien Austritt verſtatten kann. Im Allgemeinen iſt auch die Luftröhre der Vögel biegſamer als die der Säugethiere und namentlich bei den Singvögeln aus ſehr feinen Ringen zuſammengeſetzt.

159. Das Sinnesorgan, welches zur Aufnahme des Schalles dient, läßt ſich zunächſt nach drei Haupttheilen betrachten. Dieſe Theile ſind das äußere Ohr, nämlich die Ohrmuſchel und der Gehörgang, die Trommelhöhle und das Labyrinth mit den Gehörnerven. Durch das Trommelfell wird der äußere Gehörgang von der Trommelhöhle geſchieden, in welchem ſich vier kleine Knöchelchen, der Hammer, Ambos, Steigbügel und das linſenförmige Knöchelchen des Sylvius befinden. Der Hammer iſt mit ſeinem Griffe an die innere Seite des Trommelfells angewachſen, während ſein Kopf durch eine Gelenkfläche mit dem Ambos verbunden iſt. Der Ambos hat zwei ungleich lange Schenkel, von denen der längere durch das linſenförmige Knöchelchen mit dem Steigbügel in Verbindung ſteht. Mit dem Labyrinthe communicirt die Trommelhöhle durch zwei Oeffnungen, welche unter den Namen des ovalen und runden Fenſters bekannt ſind. Das runde Fenſter iſt mit einer zarten Membran überzogen, während das ovale durch die Baſis des Steigbügels verſchloſſen iſt. Auch geht noch ein etwa 2 Zoll langer Kanal, die ſogenannte Euſtachiſche Röhre, von der Trommelhöhle aus nach der Mundhöhle, wodurch ſich die in der Trommelhöhle enthaltene Luft fortwährend mit der äußeren in's Gleichgewicht ſetzen kann. Das Labyrinth beſteht aus dem Vorhofe, welcher eben durch das ovale Fenſter mit der Trommelhöhle zuſammenhängt, den drei halbkreisförmigen Kanälen und der Schnecke. Die halbkreisförmigen Kanäle beſtehen aus knöchernen, mit einer Flüſſigkeit gefüllten Röhren, welche im Vorhofe auslaufen und wieder dahin zurückkehren. Die Schnecke iſt ein knöcherner, ſpiralförmiger Kanal von dritthalb Windungen; er iſt mit zarter Markſubſtanz gefüllt und wird der Länge nach durch eine feine knöcherne Platte, welche ſehr porös und zellig iſt, in zwei Theile, die ſogenannten Treppen getheilt. In dem Labyrinthe befindet ſich auch

Digitized by Google

der Gehörnerv, welcher sich theils in dem Vorhofe, theils in den halbkreisförmigen Kanälen, theils in der Schnecke ausbreitet, wo er strahlenartig mit büschelförmigen Enden erscheint, während er in jenen Kanälen eine zwar zusammenhängende, aber nicht gefaserte Substanz bildet.

Die verschiedenen Theile des Gehörorganes haben eine sehr geschützte Lage; so geht der äußere Gehörgang durch den Knochen des Schläfebeins und das Labyrinth liegt ganz in dem außerordentlich harten Knochen, welchen man das Felsenbein nennt.

Die Säugethiere, Vögel und eine große Anzahl von Amphibien besitzen ein Gehörorgan, dessen wesentliche Theile mit denen des menschlichen übereinstimmen. Den Fischen fehlt die Schnecke und den nackten Amphibien das runde Fenster. Bei einigen Thieren aber, z. B. den Krebsen, wird das Gehör nur durch ein mit Flüssigkeit gefülltes Bläschen bildet, auf dem sich ein Nerv ausbreitet.

160. Was nun den Proceß des Hörens im Allgemeinen anlangt, so werden die Schallwellen von der Ohrmuschel aufgenommen und durch den äußeren Gehörgang zum Trommelfelle geleitet, welches dadurch in Bewegung geräth. Diese Bewegung pflanzt sich durch die Gehörknöchelchen und die in der Trommelhöhle befindliche Luft zur Flüssigkeit des Labyrinthes fort, wo sie unmittelbar in den Nerv übergeht. Uebrigens kann auch der Schall, wenn das Trommelfell und die Gehörknöchelchen verletzt sind, durch die Luft in der Trommelhöhle zum runden Fenster und von da in's Labyrinth fortgepflanzt werden. Auch ist es bekannt, daß man den Schall durch die Zähne und anderen festen Theile des Kopfes wahrnehmen kann. So lassen sich, wie man weiß, die Töne eines schallenden Körpers sehr wohl hören, wenn man mit ihm das eine Ende eines Stabes in Verbindung bringt, während man das andere an den Kopf oder zwischen die Zähne hält.

Durch einen am Hammer befindlichen Muskel kann das Trommelfell, in dessen Mitte der Griff des Hammers befestigt ist, mehr oder weniger gespannt werden. Bei leisen Tönen zieht dieser Muskel das Trommelfell nach innen, während zugleich der Steigbügel durch einen mit ihm verbundenen Muskel gegen das ovale Fenster gezogen wird. Um aber den Gehörnerv gegen einen zu heftigen Eindruck des Schalles zu schützen, ziehen zwei andere Muskeln des Hammers, die sogenannten Erschlaffer, das Trommelfell nach außen und dadurch den Steigbügel vom ovalen Fenster zurück. Man sieht also, daß die Anspannung und Erschlaffung des Trommelfells mit einer entsprechenden Veränderung der Gehörknöchelchen auf's Engste verbunden ist.

Digitized by Google

Zweiter Theil.

Die Lehre von den unwägbaren Stoffen oder sogenannten Imponderabilien.

Digitized by Google

Digitized by Google

Ueber die Imponderabilien im Allgemeinen und über die Schwere insbesondere.

1. In den Grundbetrachtungen des ersten Theiles haben wir erkannt, daß die Materie mit ihrer Cohäsion, Elasticität und Gestaltung in einer Verbindung ungleichartiger Elemente ihren Grund habe. Der Gegensatz zwischen diesen Elementen kann stärker oder schwächer, gleich oder ungleich sein, worauf eben die Verschiedenheit der Materie beruht. Die Gleichheit und Ungleichheit des Gegensatzes bezieht sich aber, wie wir wissen, auf das Verhältniß, in welchem sich bestimmte Elemente zu kleinsten Massentheilchen mit einander verbinden. Je größer der Gegensatz zwischen den Elementen, desto stärker ihre Anziehung und um so haltbarer auch die aus ihnen gebildete Materie. Zunächst ist aber die Materie starr und strebt auch, sofern kein Hinderniß vorhanden ist, zur Starrheit in bestimmter Gestaltung. Da nun aber die mannichfachste Abstufung der Größe und Ungleichheit des Gegensatzes zwischen den Elementen in hohem Grade wahrscheinlich ist, so kann es auch solche Elemente geben, welche wegen der Schwäche oder allzugroßer Ungleichheit ihres Gegensatzes gegen andere nicht geeignet sind, mit diesen cohärente Materie zu bilden. Die bisher angeführten Unterschiede des Gegensatzes zwischen den Elementen führen jedoch durch Combination zu verschiedenen Fällen.

So kann der Gegensatz gewisser Elemente gegen alle diejenigen, welche zur Bildung starrer Materie tauglich sind, zwar *stark*, aber dabei *sehr ungleich* sein, so daß sich ein einziges Element oder Massentheilchen der Materie mit einer außerordentlich großen Anzahl solcher Elemente verbinden kann, ehe das Maximum der Reaction eintritt. Insofern nun diese Elemente unter sich gleich sind, werden sie auch auf Grund gegenseitiger Reaction die Elemente und Molecule der Materie gleichmäßig einhüllen oder Sphären um dieselben bilden.

Digitized by Google

Das hieraus entstehende Gleichgewicht der Attraction und Repulsion wird gestört, wenn sich fortwährend neue Sphären von außen anschließen. Während nämlich die äußeren Sphären nach innen drängen, wird im Innern die Repulsion verstärkt, so daß das Massentheilchen selbst oder irgend eine seiner inneren, dichteren Sphären ausstrahlend wirkt, mit einer Geschwindigkeit, welche dem Drucke von allen Seiten entspricht. Freilich entsteht hier die Frage, ob die Ausstrahlung in einer wirklichen Zerstreuung der Elemente nach allen Richtungen besteht oder ob die Repulsion blos eine Oscillation der Elemente vom Molecul aus zur Folge hat. Im Allgemeinen ist das Eine so gut möglich als das Andere, weswegen wir vorläufig nichts darüber entscheiden wollen. Nehmen wir eine größere Masse an, so müssen sich um jedes Molecul, ja um jedes Element derselben Sphären bilden. Dies wird aber je nach der Beschaffenheit (namentlich dem Grade der Dichtigkeit) der mit einander verbundenen Molecule einen hohen Grad von Repulsion herbeiführen, womit die Ausstrahlung in demselben Verhältnisse wachsen wird, bestehe sie nun in einer wirklichen Zerstreuung oder in einer Vibration der Elemente. Zugleich ist aber wegen der Repulsion die Masse einer Gewalt ausgesetzt, welche sie aufzulösen droht, damit jene Elemente ihre Sphären bilden können. Diese Sphären werden also der Cohäsion stets entgegenwirken und umgekehrt auch durch sie Bestimmungen empfangen. Auch sieht man, daß eine Störung in der gegenseitigen Lage der Massentheilchen eines Körpers, z. B. durch Druck oder Reibung, gleichzeitig eine Veränderung jener Sphären mit sich führen muß. Wegen der großen Ungleichheit des Gegensatzes aber, zufolge dessen sich mit einem einzigen Molecul der Materie eine sehr große Anzahl dieser Elemente vereinigen kann, wird die Wirksamkeit der Sphären sich durch einen bedeutenden Raum hin erstrecken können.

Dann kann auch der Gegensatz gewisser Elemente gegen die Bestandtheile der Materie schwach, dabei aber viel weniger ungleich sein als im vorigen Falle. Nehmen wir beispielsweise an, daß eine Million von Elementen der vorigen Art im Stande ist, ein einziges Element der Materie zu einer starken Reaction zu veranlassen, so mögen im gegenwärtigen Falle nur hundert Elemente dazu nöthig sein. Wegen der Schwäche des Gegensatzes ist hier die Reaction geringer, aber doch in ihrer Art vollständig und kann als eine solche, wie sie ist, nicht überstiegen werden, so daß sich die hundert Elemente unter einander in Hinsicht auf den Grad der Repulsion eben so verhalten als gleichviel Elemente jener Art unter sich, wenn sie gegen dasselbe

Digitized by Google

Element der Materie in Reaction begriffen sind. Wie stark indessen auch die Repulsion im vorigen Falle durch Anhäufung der Elemente in der Materie werden kann, so wirkt ihr doch wegen der Stärke des Gegensatzes, so lange eine gewisse Zahl nicht überschritten wird, eine bedeutende Attraction entgegen, was hier nicht der Fall ist. Das Gleichgewicht der Attraction und Repulsion besteht hier für eine weit geringere Anzahl von Elementen, weshalb sich hier auch eine verstärkte Repulsion viel früher als dort einstellen wird, und da der Gegensatz und folglich auch die Anziehung zwischen diesen Elementen und der Materie gering ist, so muß bei einer Anhäufung solcher Elemente um so mehr eine heftige Repulsion eintreten, welche dem Zusammenhange der Elemente oder Massentheilchen der Materie große Gefahr bringen kann.

Ein Hauptunterschied zwischen dieser und der vorigen Art von Elementen liegt darin, daß die Materie gegen letztere bei Weitem nachgiebiger sein wird als gegen erstere. Von den oben besprochenen Elementen wird sie sich stetig ausdehnen lassen, weil ihre Molecule wegen der Stärke der Attraction mit den Elementen innig zusammenhängen. Mit der Ausdehnung vermindert sich zugleich die Repulsion, weshalb sich die Sphären nunmehr besser um die Molecule, von denen sie angezogen werden, ordnen können als vorher, wo sie mehr in einander verschränkt lagen. Dagegen können unsere jetzigen Elemente wegen der Schwäche der Anziehung nur eine schnell vorübergehende Ausdehnung der Materie hervorbringen. Die Molecule ziehen sich in Folge vermehrter innerer Spannung augenblicklich wieder zusammen, falls nicht die Materie durch zu große Anhäufung dieser Elemente vermöge der heftigen Repulsion zerrissen und zerstäubt wird.

Endlich kann aber auch der Gegensatz gewisser Elemente gegen die Elemente oder die Molecule der Materie schwach und dabei sehr ungleich sein. Solche Elemente werden gleich den beiden vorigen um die Massentheilchen der Materie Sphären bilden, ohne wegen der gleichzeitig stattfindenden Schwäche und großen Ungleichheit des Gegensatzes die Zustände derselben merklich abändern zu können. Weder Attraction noch Repulsion können hier von auffallender Wirkung sein, wenn nicht besondere Umstände obwalten. Dagegen wird die Sphärenbildung dieser Elemente um die Materie gleichförmiger sein als in den beiden vorigen Fällen, und da ein Molecul der Materie sich mit einer zahllosen Menge solcher Elemente verbinden kann, so wird sich die Wirksamkeit der Sphären durch einen sehr großen Raum verbreiten, je nach der Größe der Masse, mit welcher sie in Verbindung stehen.

Digitized by Google

Elemente dieser Art sind geeignet, zwischen verschiedenen, weit auseinander liegenden Körpern eine Gemeinschaft zu stiften, wobei es vorzugsweise auf die Masse, als solche, ankommen wird.

2. Alle diese verschiedenen Elemente haben also das mit einander gemein, daß sich ihre Wirkungen strahlenartig von einem Punkte ausbreiten, der von einem Elemente oder Massentheilchen der Materie gebildet wird. Man gewahrt, daß durch solche Elemente eine große Mannichfaltigkeit der Naturerscheinungen herbeigeführt werden muß. Namentlich sind die beiden ersteren Arten von Elementen im Stande, das Gleichgewicht starrer Körper fortwährend abzuändern. Daß es derartige Elemente überhaupt gebe, ist nicht allein a priori höchst wahrscheinlich, sondern unterliegt auch wohlbegründeten Thatsachen zufolge keinem Zweifel. Wären nur Elemente von starkem und nicht sehr ungleichem Gegensatze vorhanden, so würden im Grunde nur starre Körper existiren, welche zwar bei ihrem Zusammentreffen mechanisch und chemisch auf einander wirken könnten, aber selbst die chemische Wirksamkeit würde nur in sehr enge Grenzen eingeschlossen sein. (Man denke hier nur beiläufig an den Einfluß der Wärme und Elektricität auf den chemischen Proceß). Aber die unbegrenzte Mannichfaltigkeit der Elemente läßt erwarten, daß Gegensätze in allen Abstufungen zwischen ihnen vorkommen, woraus denn weiter folgt, daß manche Elemente zur Bildung starrer Materie nicht geeignet sind. Während nun die am meisten entgegengesetzten Elemente sich zu starren Massen mit einander verbinden und im Großen Weltkörper darstellen, dienen die anderen zu Mittelgliedern, welche theils einen beständigen Wechsel in der Materie bewirken, theils die Räume zwischen den Weltkörpern ausfüllen und dadurch eine Gemeinschaft der letzteren unterhalten.

Die angeführten Elemente erinnern an jene Stoffe, welche man in der Physik Imponderabilien zu nennen pflegt und den Erscheinungen des Lichts, der Wärme und der Elektricität zu Grunde gelegt hat. Wir wollen diese Elemente unter dem Namen des Aethers zusammenfassen. Im Vorhergehenden sind wir durch Vergleichung zu drei verschiedenen Aetherarten geführt worden, welche also das mit einander gemein haben, daß sie die Molecule der Materie und letztere selbst in mehr oder weniger großen Sphären einhüllen. Nach dem Bisherigen versteht sich von selbst, daß man sich unter dem Aether keine feine Materie denken darf, da er aus einzelnen (isolirten) Elementen besteht, während die Materie, sie sei nun grob oder fein, schon eine Verbindung entgegengesetzter Elemente ist. Ob nun

Digitized by Google

alle drei Aetherarten oder blos die eine oder andere in der Wirklichkeit zuläſſig ſind, kann freilich nur durch die Erſcheinungen ſelbſt entſchieden werden, wiewohl die Verſchiedenheit der Erſcheinungen, welche in das Bereich der ſogenannten Imponderabilien gehören, auch eine Verſchiedenheit der ſubſtantiellen Grundlage wahrſcheinlich macht.

Im Ganzen haben wir nun, um es nochmals kurz zuſammenzufaſſen, vier Hauptfälle des Gegenſatzes, welche aus einer vergleichenden Betrachtung der Elemente von ſelbſt hervorgehen. Dieſe Fälle ſind:

1) ſtarker und gleicher oder doch nicht ſehr ungleicher Gegenſatz,
2) ſtarker und ſehr ungleicher Gegenſatz,
3) ſchwacher und nahe gleicher oder doch nicht ſehr ungleicher Gegenſatz,
4) ſchwacher und ſehr ungleicher Gegenſatz.

Zu den Elementen des erſten Falles gehören diejenigen Elemente, aus welchen wir uns die bekannten chemiſchen Grundſtoffe zuſammengeſetzt denken müſſen. Natürlich kann auch dieſer Fall ſchon eine Menge von Abſtufungen enthalten. Der Gegenſatz kann mehr oder weniger ſtark, mehr oder weniger ungleich ſein, nur daß hier die Ungleichheit im Vergleiche mit dem zweiten und vierten Falle verſchwindet. Die zu den drei anderen Fällen gehörigen Elemente werden aber durch ihr Verhältniß zu denen des erſten charakteriſirt.

3. Die gemeinſten Wahrnehmungen des täglichen Lebens zeigen, daß die Sonne die Quelle des Lichts und der Wärme für unſere Erde iſt. Aber eben ſo leicht erkennt Jeder, daß die Sonne nicht ſchon an und für ſich ſelbſt die hierher gehörigen Erſcheinungen hervorbringen kann. Niemand wird vernünftiger Weiſe daran denken, daß die Sonne ohne Vermittelung eines Anderen durch den leeren Raum unſerem Planeten Licht und Wärme ertheilt, eben ſo wenig ſteigt ſie zu uns herab, um dies zu leiſten. Man ſieht ſich alſo abſolut genöthigt, Etwas anzunehmen, was von der Maſſe der Sonne und Planeten verſchieden iſt, aber in Verbindung mit ihnen den Phänomenen des Lichts und der Wärme zu Grunde liegt. Dieſes Etwas iſt nun entweder ein ſolches, welches unmittelbar von der Sonne (überhaupt von den ſelbſt leuchtenden Körpern) den anderen zugeſendet wird, oder es iſt allenthalben in der Natur verbreitet und wird nur von jenen Körpern in gewiſſe Zuſtände verſetzt, worin es Licht und vielleicht auch Wärme zur Erſcheinung bringt. Dies hängt zuſammen mit der Emiſſions- und Vibrationstheorie des Lichts. Nach der erſteren beſteht das Licht in einem feinen Stoffe, welcher von den ſelbſt-

Digitized by Google

leuchtenden Körpern unmittelbar nach allen Richtungen ausgestrahlt wird und in anderen Körpern durch Anziehung mancherlei Modificationen erleidet, worin eben die verschiedenen Erscheinungen des Lichts ihren Grund haben. Nach der anderen Ansicht ist der Weltraum, wie auch das Innere der Körper, von einem feinen, elastischen Fluidum erfüllt, das man Aether nennt. Dieser Aether besteht aus einzelnen Elementen, welche einander abstoßen, von Seiten der Materie aber angezogen werden. So lange sich nun die Elemente des Aethers im Zustande des Gleichgewichts befinden, herrscht Dunkelheit, werden sie aber in schwingende Bewegung versetzt — und dies geschieht durch die selbstleuchtenden Körper, — so tritt die Erscheinung des Lichts auf. Die Schwingungen des Aethers werden in verschiedenen Körpern verschiedentlich modificirt und erzeugen dadurch die mannichfachen Phänomene, welche wir am Lichte beobachten, wenn es mit diesem oder jenem Körper zusammentrifft. Die weitere Untersuchung lehrt, daß die Schwingungen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung des Lichts stattfinden müssen, wenn sie den Erscheinungen genügen sollen.

In Beziehung auf die Grundannahme sind beide Ansichten nicht wesentlich verschieden, beide kommen in der Nothwendigkeit überein, etwas von der Materie der Körper Verschiedenes anzunehmen, was die Phänomene des Lichts vermittelt. Die Newton'sche Lichtmaterie kann man füglich mit dem Aether zusammenfallen lassen, und die Hauptfrage ist dann nur die, ob der Aether unmittelbar von den selbstleuchtenden Körpern ausgestrahlt wird, um in anderen die Erscheinungen des Lichts hervorzurufen, oder ob das Wesen des Lichts seinen Grund in jenen Vibrationen hat. Während nämlich der Aether sich um die Materie der Körper durch gegenseitige Attraction verdichtet, wird die Repulsion zwischen seinen eigenen Elementen verstärkt, woraus eine Ausstrahlung des Aethers nach allen Richtungen hervorgeht. Eine solche Ausstrahlung kann bei allen Körpern vorkommen, so daß Sonne und Planeten einander wechselseitig Aether zusenden; aber nur bei den selbstleuchtenden Körpern erlangt der Aether eine solche Geschwindigkeit, daß er uns als Licht erscheinen kann. Welche von beiden Ansichten den Vorzug verdient, kann natürlich nur die Untersuchung selbst und die Erfahrung entscheiden. Wir werden später sehen, daß es namentlich die Interferenzerscheinungen des Lichts sind, welche die Richtigkeit der Vibrationstheorie auf überzeugende Weise darzuthun scheinen.

4. Vergleicht man die Wirkungen des Lichts mit den Wirkungen anderer Naturkräfte, namentlich mit denen der Wärme, Elektricität,

Digitized by Google

des Magnetismus und der chemischen Affinität, so gewahrt man leicht, daß die letzteren bei Weitem mächtiger sind, als die ersteren. Von gewaltsamer Ausdehnung und Verflüchtigung der Materie wie bei der Wärme, von einem Erschüttern, Zerstäuben und Zerreißen der Materie oder von einem Zerlegen chemischer Verbindungen nach Art der Elektricität, endlich von jener mächtigen Contraction ungleichartiger Stoffe, wie bei der chemischen Anziehung, — von diesem Allem bemerkt man beim Lichte nichts. Wir müssen hieraus den Schluß ziehen, daß die Anziehung zwischen den Elementen des Aethers und den Moleculen der Materie nur schwach und sehr ungleich ist. Anders kann es auch in der That nicht sein, wenn ein Stoff, wie der Aether, geeignet sein soll, dem Phänomen des Lichts als Grundlage zu dienen. Nur unter dieser Voraussetzung kann der Aether objectiver Grund des Sehens sein. Weil der Gegensatz zwischen ihm und der Materie nur schwach und dabei sehr ungleich ist, kann er keine bedeutenden Veränderungen in der letzteren hervorbringen und ist eben deshalb geschickt, uns die Gestalten der Körper, wie sie nun einmal sind, darzustellen. In dieser Beziehung spielt der Aether eine mehr passive Rolle, da er vorzugsweise von der Materie Bestimmungen empfängt, ohne rückwärts deren Zustände merklich modificiren zu können; deshalb hat unser Sehorgan auch eine so ausgezeichnete Empfindlichkeit. Freilich bewirkt das Licht auch chemische Veränderungen, d. h. es ist im Stande, chemische Processe einzuleiten. So kann z. B. Chlor dem Wasser unter Mitwirkung des Sonnenlichts den Wasserstoff nehmen, indem es damit Salzsäure bildet. Jedenfalls ist bei dieser Action die Anziehung zwischen Chlor und Wasserstoff die Hauptsache, während das Licht nur den Anstoß dazu giebt. Wenn die Kohlensäure in den Blättern der Pflanzen eine Zerlegung erfährt, so mag das Licht hierzu eine nothwendige Bedingung sein, aber ohne Zweifel wirken dabei noch andere Kräfte mit. Auch mag das Licht bei einer gewissen Klasse von Körpern durch seine Vibrationen eine Trennung von Stoffen bewirken, die chemisch mit einander verbunden sind, wie bei der Schwärzung des Chlorsilbers und der Reduction vieler Metalloxyde; gewiß läßt sich dies nicht vergleichen mit jener mächtigen, allverbreiteten Wirkung der Wärme, wenn sie die Materie ausdehnt oder die Aggregatformen der Körper ändert, wie bei den Processen der Schmelzung und Verdampfung. In diesem Falle zeigt sich durchweg ein mächtiges, selbstständiges Eingreifen in die Constitution der Materie, hier kommt keine chemische Affinität der Stoffe zu Hilfe, wie zum Theil bei jenen Wirkungen des Lichts.

Digitized by Google

5. Schwere und Licht, wie heterogen auch sonst die Gegenstände scheinen mögen, kommen darin überein, daß ihre Wirkungen zu den schwächsten in der Natur gehören. Auch die Schwere greift nicht wesentlich in die Constitution der Materie ein; sie hält nach einem bestimmten Gesetze verschiedene Körper bei einander, ohne sich (ungleich der chemischen Anziehung) um deren eigenthümliche Natur zu bekümmern. Die Versuche mittelst des Apparates von Cavendish zeigen, daß diejenige Anziehung zwischen den Körpern, welche man Schwere nennt, nur sehr gering ist. Die Attraction, welche die ganze Erdmasse auf Körper an ihrer Oberfläche ausübt, ist bei Weitem geringer als die chemische Affinität: wäre dies nicht der Fall, so müßten sich die unteren Theile eines frei aufgehängten Körpers von seiner Masse trennen und nach der Erde hin fallen, was aber bekanntlich nicht geschieht. Ja der schwächste Grad der chemischen Anziehung, die Adhäsion, ist schon viel mächtiger als die Schwere. Zu den Erscheinungen der Adhäsion gehört z. B. die Thatsache, welche wir früher gehörigen Orts angeführt haben, daß sich die feinen Partikeln aller Körper an senkrechte Wände oder an die Decken der Zimmer anhängen, ohne vermöge ihres Gewichts herabzufallen, was aber offenbar geschehen müßte, wenn die Schwere die Adhäsion an Stärke überträfe. So vermag auch ein Magnet von mäßiger Stärke schon eine bedeutende Last zu tragen, während sich der ganze Erdball vergebens bemüht, dieselbe fallen zu machen. Ohne Zweifel übertrifft die magnetische Anziehung die Schwere beträchtlich an Stärke. An sich, d. h. zwischen den einzelnen Moleculen, ist die Schwere nur von geringer Energie, gewinnt aber dadurch an Bedeutung, daß sie durch die Massen ganzer Weltkörper multiplicirt wird. Wenn die Sonne Herrscherin in unserem Planetensysteme ist, also alle Planeten zwingt, ihre Bahnen um sie zu beschreiben, so rührt dies bekanntlich nur daher, daß sie alle Planeten zusammen genommen weit an Masse übertrifft.

6. Sollten denn aber wohl die Weltkörper wirklich unmittelbar durch den leeren Raum auf einander einwirken, in Folge dessen sie zu einander hinstreben? Die chemischen Erfahrungen lehren mit positiver Gewißheit, daß nur bei unmittelbarer, innigster Berührung der Stoffe eine gegenseitige Einwirkung derselben stattfindet. Auch die Cohäsions- und Adhäsionserscheinungen treten nur unter dieser Bedingung deutlich zu Tage. Sollte wirklich die allgemeine Massenanziehung eine Ausnahme hiervon machen? Freilich lassen sich alle Gravitationserscheinungen der Weltkörper ableiten aus einer wech-

Digitized by Google

seitigen Anziehung, die im directen Verhältnisse mit den Massen und im umgekehrten mit dem Quadrate der Entfernung je zweier Weltkörper steht. Daß die materiellen Theilchen verschiedener Weltkörper nach dem eben ausgesprochenen Gesetze in die Ferne auf einander wirken, unterliegt keinem Zweifel, die Frage ist nur, ob dies unmittelbar geschieht. Das Letztere widerspricht aber Vielem, was wir aus Thatsachen positiv wissen. Wenn Stoffe einander berühren, so läßt sich wenigstens die Möglichkeit eines gegenseitigen Einwirkens derselben denken, aber eine Wirkung in die Ferne und zwar durch den leeren Raum liegt in der That jenseits der Grenzen aller Denkbarkeit. Die chemische Anziehung heterogener Stoffe ist gewiß sehr energisch und doch bemerken wir nichts davon, sobald die Stoffe in der kleinsten meßbaren Entfernung auseinander liegen. Die unmittelbare, innige Berührung der Stoffe ist überall die erste Bedingung chemischer und auch mechanischer Wirksamkeit. Wir haben Grund anzunehmen, daß diese Bedingung bei allen Wirkungen in der Natur erfüllt werden muß. Wir wissen: es ist überhaupt undenkbar, daß eine Masse da wirksam sei, wo sie nicht ist.

7. Wir vergegenwärtigen uns jetzt noch einmal jenen Aether, von dem wir annahmen, daß die Anziehung zwischen ihm und den Moleculen der Materie nur schwach sei. Erfüllt dieser Aether den Weltraum, so wird er sich den Moleculen der Materie sowohl im Innern als auch an der Oberfläche der Körper anschließen müssen. Ist aber die Anziehung zwischen diesem Aether und der Materie nicht nur schwach, sondern auch dergestalt ungleich, daß ein einziges Molecul der Materie eine außerordentlich große Anzahl von Elementen des Aethers mit sich vereinigen kann, so wird sich bei einer größeren Masse die Anziehung von der Oberfläche aus ringsum in eine bedeutende Entfernung erstrecken. Denn die Elemente des Aethers werden nach unseren früheren Betrachtungen die Molecule der Materie rings einhüllen oder Sphären um dieselben bilden, und ebenso wird der Aether den ganzen Körper in sphärenartigen Schichten umschließen. Die Ausdehnung dieser Schichten im Raume wird aber von der Masse des Körpers abhängen. Denken wir uns diesen Körper einem verhältnißmäßig kleineren genähert, so wird sich der Aether dem letzteren auf ähnliche Weise anschließen wie dem ersteren, und weil der Aether rings um den größeren Körper schon mit diesem durch Attraction verknüpft ist, so wird er, während er in die Molecule des kleineren eingreift, diesen zu jenem hinziehen, so daß es den Anschein gewinnt, als ob der größere Körper den kleineren unmittelbar anzöge.

Digitized by Google

In der That ist hiernach die Anziehung zwischen beiden Körpern vermittelst des Aethers gegenseitig und das Resultat wird dasselbe sein, als ob die Molecule der Körper unmittelbar anziehend auf einander wirkten.

Doch ist es eben nicht wahrscheinlich, daß die Aetherſphären einen Weltkörper gleichsam wie eine unermeßliche, ruhig liegende Atmosphäre umgeben werden. Denn während die Elemente des Aethers in außerordentlich großer Zahl jedes Molecul eines Körpers vermöge wechselseitiger Anziehung einhüllen, wird nach bekannten Grundsätzen zwischen den Elementen des Aethers selbst Repulsion entstehen. Wegen der Schwäche und Ungleichheit des Gegensatzes wird freilich diese Repulsion keine wirkliche Zerstreuung, sondern nur eine Ausdehnung des Aethers zur Folge haben, welche so weit als die Attraction reicht. Wir haben hier also nur eine wechselnde Contraction und Expansion des Aethers, d. h. eine Oscillation desselben zu erwarten. Betrachten wir der Einfachheit wegen die Weltkörper als Kugeln, so werden sich die gesammten Aetherſphären in Kugelschichten abwechselnd zusammenziehen und ausdehnen.

Jeder Körper veranlaßt also den Aether durch den Wechsel der Attraction, welche zwischen ihm und allen Moleculen der Materie stattfindet, und der Repulsion, welche aus der Verdichtung des Aethers zwischen seinen eigenen Elementen entsteht, zu einem besonderen Systeme von Schwingungen, das sich je nach der Masse des Körpers in eine unermeßliche Entfernung erstrecken kann. Mehrere Weltkörper zusammen genommen veranlassen aber ein solches System von Aetherschwingungen, als ob dasselbe von ihrem gemeinschaftlichen Schwerpunkte ausginge. Die Rückwirkung des schwingenden Aethers ist es nun, was sie wirklich gegen ihren gemeinschaftlichen Schwerpunkt hintreibt, so als ob in diesem die Gravitation ihren Sitz hätte. Hiernach erkennt man leicht, daß derjenige das ganze System beherrschen wird, dessen Masse die aller übrigen zusammen genommen an Größe übertrifft.

8. Wir wollen nun etwas näher die Einwirkung betrachten, welche irgend ein Weltkörper auf andere kleinere Körper ausübt, die sich im Bereiche seiner Aetherſphären befinden, z. B. die Wirkung der Erde auf Körper an ihrer Oberfläche.

Nur während der Rückwirkung des schwingenden Aethers, also indem er sich verdichtet, kann eine merkliche Anziehung von Seiten der Erde auf jene Körper stattfinden, nicht aber in dem Moment, in welchem er sich ausdehnt. Im letzteren Falle läßt sich die Wirkung,

Digitized by Google

welche etwa statthaben sollte, als eine völlig verschwindende Größe betrachten. Sucht man nach einer wenigstens zum Theil hierher passenden Analogie, so erinnere man sich der Wirkung des Weingeistes auf das Glasstäbchen in dem bekannten Instrumente, welches zur Bestimmung der niedrigsten Temperatur dient, die während irgend eines Zeitraumes stattgefunden hat. Man hat hier nämlich ein horizontal liegendes Weingeistthermometer, in dem sich das Stäbchen befindet. Sobald sich nun der Weingeist durch Erkaltung zusammenzieht, wird das Glasstäbchen in Folge der Adhäsion zwischen Weingeist und Glas durch die sich zurückziehende Weingeistsäule gegen die Kugel der Röhre hin mitgenommen. Dehnt sich aber der Weingeist durch Erwärmung wieder aus, so geht er beim Steigen des Thermometers an dem Stäbchen vorbei, ohne es fortzuschieben. Wie schon bemerkt, läßt sich diese Wirkung des Weingeistes nur ungefähr mit dem Verhalten des Aethers zu den Moleculen der Materie vergleichen, von denen jedes seinen Beitrag zur Wirkung giebt, da es vom Aether vermöge gegenseitiger Attraction eingehüllt ist.

Jede Rückwirkung des schwingenden Aethers ertheilt einem Körper eine gewisse Geschwindigkeit, die durch jede folgende vermehrt wird. Man kann auch eine solche Rückwirkung füglich mit der Wirkung eines Druckes oder Stoßes vergleichen. Gewöhnlich betrachtet man die Schwere als eine continuirliche Kraft, d. h. als eine solche, welche (wenigstens innerhalb gewisser Grenzen) in gleichen Zeiten gleiche Geschwindigkeiten hervorbringt. Um aber das Gesetz für die Bewegung freifallender Körper zu ermitteln, haben wir, wie dies häufig geschieht, angenommen, daß die bewegende Kraft stoßweise wirke. Man denkt sich nämlich die Zeit t, binnen welcher der Weg s kraft der Schwere zurückgelegt wird, in eine Anzahl n gleicher Theile, deren jeder $= \tau$ sein mag, getheilt und am Anfange eines jeden Zeittheilchens dem Körper ein Zusatz $\frac{c}{n} = p$ an Geschwindigkeit beigebracht, wenn c die Geschwindigkeit ist, welche der Körper überhaupt während der Zeit t erlangt. Diese Darstellungsweise möchte dem wirklichen Stande der Sache nach unserer Ansicht entsprechen.

Die Wege, welche in den auf einander folgenden Zeittheilchen zurückgelegt werden, sind der Reihe nach

$$p\tau,\ 2p\tau,\ 3p\tau \ldots\ np\tau,$$

also der ganze Weg

$$s = p\tau + 2p\tau + 3p\tau + \ldots + np\tau = p\tau(1+2+3+\ldots n)$$

oder

Digitized by Google

$$s = p\tau\,(n+1)\,\frac{n}{2} = \frac{n^2 p\tau}{2} + \frac{n^2 p\tau}{2n}.$$

Nun ist $c = np$ — der Endgeschwindigkeit und $n\tau = t$, daher

$$s = \frac{ct}{2} + \frac{ct}{2n}.$$

Das zweite Glied dieser Formel wird aber um so kleiner, je größer n, d. h. je schneller die Rückwirkungen des schwingenden Aethers auf einander folgen oder in je kürzerer Zeit die Aetherschwingungen vollendet werden. Nimmt man an, daß die Schwingungszeit außerordentlich klein ist oder sich dem nähert, was man unendlich klein nennt, so läßt sich $n = \infty$ setzen, in Folge dessen das zweite Glied jener Formel verschwindet. Daher

$$s = \frac{ct}{2}$$

oder, weil $c = gt$, wenn g die Geschwindigkeit ist, welche binnen der Zeiteinheit erzeugt wird,

$$s = {}^1/_2\, gt^2.$$

Das Resultat jener Rückwirkungen auf einen Körper wird mithin dasselbe sein, als ob man die Bewegung freifallender Körper einer continuirlich bewegenden Kraft zuschriebe.

Auch kann man bei der Betrachtung des freien Falles der Körper von geringen Höhen ohne merklichen Fehler annehmen, daß die auf einander folgenden Rückwirkungen des schwingenden Aethers gleich sind. Außerdem wird man aber bemerken, daß die Wirkung mit der Entfernung von der Erde abnehmen muß, denn je weiter die Aetherschichten von der Oberfläche der Erde entfernt liegen, desto geringer ist ihr Zusammenhang mit der letzteren, desto geringer ihre Dichtigkeit; von diesem Umstande hängt aber gerade die Intensität der Wirkung ab. Da sich nun die Oberflächen verschiedener Kugeln verhalten wie die Quadrate ihrer Halbmesser, so wird die Wirkung mit dem Quadrate der Entfernung abnehmen.

Die verschiedenen Planeten werden sich aber in den Aethersphären der Sonne, ihres Centralkörpers, großentheils auf ähnliche Weise verhalten, wie jene Körper über der Oberfläche der Erde.

9. Den vorhergehenden Betrachtungen gemäß spaltet sich also der Aether in zwei verschiedene Systeme von Schwingungen; das eine bewirkt die Phänomene der Gravitation, das andere, bei welchem die Theilchen senkrecht zur Richtung der Fortpflanzung schwingen, liegt den Erscheinungen des Lichts zu Grunde. Beim ersteren Systeme, wo der Aether nur eine Verbindung verschiedener Körper durch seine

Digitized by Google

Attraction zur Materie zu vermitteln hat, kommt es nicht wesentlich auf die eigenthümliche Natur verschiedener Molecule an, sondern nur auf deren Masse. Denn wenn die Anziehung des Aethers gegen alle Molecule der Materie schwach und ungleich ist, so können die specifischen Differenzen, welche aus dem Zusammentreffen des Aethers mit verschiedenen Moleculen hervorgehen, in der Erscheinung des Ganzen nur von verschwindender Größe sein. Die Wirkung wird von der Masse abhängen. Bestände aber ein Weltkörper aus solcher Materie, deren Verhältniß zu den Elementen des Aethers ein beträchtlich anderes als das angeführte wäre, so würde allerdings auch das Qualitative dieser Materie von Belang sein.

Die Erscheinungen des Lichts werden lediglich bedingt durch den Zustand der Bewegung, in welchem sich die Elemente des Aethers befinden. Die Schwingungen der Aethertheilchen, welche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung des Lichts vor sich gehen und sich von der Oberfläche der leuchtenden Körper successiv fortpflanzen, müssen verschiedene Modificationen erleiden, wenn sie zu Körpern gelangen, in denen der Aether auf verschiedene Weise gruppirt ist, worin, wie wir noch sehen werden, die verschiedenen Phänomene der Brechung und Polarisation des Lichts ihren Grund haben. —

Man hat wohl bemerkt, daß die oben vorgetragene Ansicht über den Grund der Gravitation noch einer weiteren Ausbildung fähig ist. Den Aether als solchen können wir mit dem Auge nicht wahrnehmen, eben weil er objectiver Grund des Sehens ist; eben so wenig giebt er sich durch Schwere zu erkennen, denn er ist objectiver Grund derselben und als solcher ohne Schwere. An sich sind aber die Molecule der Materie so wenig schwer wie die Elemente des Aethers, nur durch die Vermittelung des letzteren gerathen erstere in eine Verbindung, welche die Erscheinung der Schwere zur Folge hat. Ohne den Aether würden die heterogenen Stoffe ihrer Eigenthümlichkeit gemäß chemisch auf einander wirken, falls sie mit einander in Berührung kämen, oder Adhäsion oder Cohäsion oder sonstige Modificationen der Affinität zeigen, in der Ferne aber gar keine Wirkung gegen einander äußern.

Nimmt man an, wie man wohl kaum umhin kann, daß auch das Wesentliche der Wärme und Elektricität in etwas Substantiellem bestehe, so müssen beide ohne Schwere sein, wenn die ihnen zu Grunde liegenden Elemente in keinem Verhältnisse der Anziehung zu jenen Elementen stehen, welche die Körper nach dem Obigen auf unsichtbare Weise mit einander verbinden und so die Phänomene der Gravitation bedingen.

Digitized by Google

Erster Abschnitt.

Vom Lichte.

Erstes Kapitel.

Ueber die Erscheinungen des Lichts im Allgemeinen.

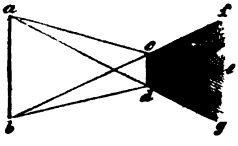
10. Man unterscheidet die selbstleuchtenden Körper von den dunkelen, welche letztere nur dadurch sichtbar werden, daß ihnen von jenen Licht mitgetheilt wird. Zu den ersteren rechnet man außer der Sonne, den Fixsternen und etwa den Kometen noch die brennenden und phosphorescirenden Körper. Viele an sich dunkele Körper können unter mancherlei Umständen selbstleuchtend werden, so verschiedene Thier- und Pflanzenstoffe beim Beginne der Verwesung, gewisse andere Körper durch Stoßen, Schlagen, Reiben oder Erwärmen. Auch giebt es Körper (sogenannte Lichtsauger), welche, eine Zeitlang dem Sonnenlichte ausgesetzt, einen Lichtschein verbreiten. Dahin gehören z. B. gebrannter Schwerspath und verschiedene Kalksalze.

Körper, welche das Licht durchlassen, wie Glas, Luft, u. s. w. nennt man durchsichtige, solche dagegen, bei denen dies nicht der Fall ist, undurchsichtige; zwischen beiden stehen die halbdurchsichtigen oder durchscheinenden Körper. Uebrigens zeigen sich sehr dünne Blättchen von undurchsichtigen Körpern durchsichtig oder durchscheinend, während dicke Massen von durchsichtigen Körpern undurchsichtig sind.

11. Wie ein leuchtender Punkt, so verbreitet auch ein leuchtender Körper sein Licht nach allen Richtungen, und zwar geschieht dies, so lange das Mittel gleichartig ist, in geraden Linien, wie man leicht daraus erkennt, daß ein für das Licht undurchdringlicher Körper die

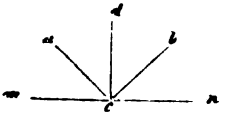
Digitized by Google

Sichtbarkeit eines anderen nur dann hindert, wenn er sich in den geraden Linien befindet, welche man sich vom Auge zu den Punkten des zu sehenden Körpers gezogen denken kann. In diesem Falle erzeugt sich auch dasjenige, was man Schatten nennt. Die Lichtstrahlen, welche ein Körper von einem leuchtenden Punkte empfängt, bilden zusammen einen Lichtkegel, dessen Spitze der leuchtende Punkt selbst ist und dessen jenseits des Körpers liegender Theil den Schatten begrenzt. Ist jedoch die Lichtquelle ein Körper von größerer Ausdehnung, so bemerkt man außer dem Raume, welcher gar kein Licht erhält und deshalb Kernschatten heißt, noch einen anderen, zu welchem nur von einigen Punkten des leuchtenden Körpers Lichtstrahlen gelangen.

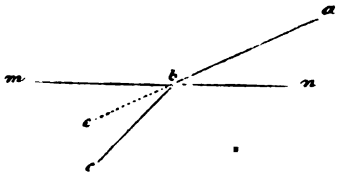


Ist in nebenstehender Figur ab der leuchtende, cd der beleuchtete Körper, so ist cde der Kernschatten, während ecf und edg zusammen den sogenannten Halbschatten bilden. Letzterer nimmt zu beiden Seiten des Kernschattens stufenweise ab, sowie er an Breite zunimmt. Beide Schatten gehen allmälig in einander über, so daß sie nur nahe hinter dem Schatten werfenden Körper einigermaßen scharf begrenzt sind.

12. Wenn das Licht an die Grenze zweier ungleichartiger Mittel gelangt, so kehrt es zum Theil in das vorige Mittel zurück, während ein anderer Theil in das neue Mittel eindringt. Dabei haben beide Theile, sowohl der in's vorige Mittel zurückgehende als auch der in das neue eindringende, eine andere Richtung wie der ursprüngliche Lichtstrahl, wofern dessen Richtung schief gegen die Trennungsfläche beider Mittel war. Auch findet hierbei gewöhnlich eine Aenderung in der Intensität des Lichts statt. Man nennt jenen Strahl, welcher in das alte Mittel zurückgeht, den reflectirten, den anderen aber, welcher in das neue eindringt, den gebrochenen. Die Reflexion oder Spiegelung des Lichts kann man deutlich beobachten, wenn man in einem dunkelen Zimmer ein Bündel Sonnenstrahlen auf eine polirte Glas- oder Metallplatte fallen läßt. Ein Strahl z. B., welcher in der Richtung ac auf eine solche Platte trifft, wird in der Richtung cb zurückgeworfen oder reflectirt. Geht aber ein Lichtstrahl ab (s. d. folgende Fig.) aus einem Mittel in ein anderes (ungleichartiges) über, z. B. aus Luft in Wasser, so erleidet er an der Trennungsebene mn eine Ablenkung, indem er im Wasser nach der Geraden bc fortgeht, und umgekehrt, wenn ein Lichtstrahl cb aus dem Wasser in die

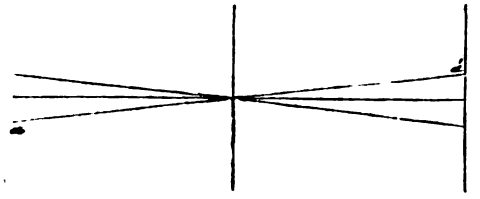


Digitized by Google



Luft übergeht, so bewegt er sich von der Grenzfläche aus in der Richtung ba fort. Befindet sich daher im Wasser bei c ein Gegenstand, so wird ihn das Auge bei a in der Richtung ae wahrnehmen. Hiervon kann man sich auf bekannte Weise leicht überzeugen, wenn man auf den Boden eines Gefäßes ein Geldstück legt und sich dann soweit entfernt, bis man es eben nicht mehr sieht. Gießt man nun Wasser in das Gefäß, so wird das Geldstück allmälig wieder vollkommen sichtbar.

Befindet sich in einem verfinsterten Zimmer eine sehr kleine Oeffnung an einem Fensterladen, so bilden die eindringenden Sonnenstrahlen einen Lichtkegel, dessen Spitze in der Oeffnung liegt. Fängt man diesen Kegel mit einem Schirme oder einer weißen Tafel auf, so erhält man als Bild der Sonne einen hellen Fleck auf dunkelem Grunde. Dieses Bild erscheint immer rund, mag nun die kleine Oeffnung selbst rund oder eckig sein; denn jedes Lichtbündel, welches von einem Punkte der Sonne ausgeht, giebt ein Bild der Oeffnung, so daß alle Bilder der Oeffnung in einen Kreis zu liegen kommen und zusammen das Bild der Sonne darstellen. Da sich die Strahlen innerhalb der Oeffnung durchkreuzen, so erhält man von allen außerhalb liegenden Gegenständen, welche durch die Oeffnung Licht senden, auf der gegenüberstehenden Wand des Zimmers verkehrte Bilder.



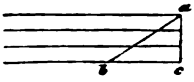
13. Das Licht verbreitet sich von einem leuchtenden Punkte aus nach allen Richtungen, daher muß seine Intensität mit der Entfernung von diesem Punkte abnehmen, indem jede um den Punkt gedachte Kugelfläche alles von ihm ausgehende Licht auffängt. Die Oberflächen der Kugeln verhalten sich wie die Quadrate ihrer Halbmesser, deshalb nimmt auch die Intensität der Beleuchtung mit dem Quadrate der Entfernung von dem leuchtenden Punkte ab. Sämmtliche Punkte einer Kugelfläche, in deren Mittelpunkte sich der leuchtende Punkt befindet, werden senkrecht von den Lichtstrahlen getroffen. Wenn nun eine kleine Ebene von Lichtstrahlen, welche ein Punkt aussendet, senkrecht getroffen wird, so muß sich gleichfalls die Intensität der Beleuchtung um-

Digitized by Google

gekehrt wie das Quadrat der Entfernung vom leuchtenden Punkte verhalten. Denn der senkrechte Querschnitt des Strahlenkegels, welcher auf die Fläche fällt, wird um so größer, je weiter sich die letztere vom leuchtenden Punkte entfernt und ist dem Quadrate der Entfernung von diesem Punkte gerade proportional, woraus folgt, daß jedes Theilchen der Fläche bei größerer Entfernung in dem oben angeführten Verhältnisse weniger Licht empfängt.

Will man die Leuchtkräfte verschiedener Lichtquellen durch den Versuch mit einander vergleichen, so stelle man in einem dunkelen Zimmer vor einer weißen Wand ein undurchsichtiges Stäbchen auf und hinter dasselbe zwei Lichtquellen A und B. Alsdann muß das Stäbchen auf die weiße Wand zwei Schatten werfen, von denen der eine nur durch das Licht A, der andere nur durch das Licht B beleuchtet wird, während alle übrigen Theile der Wand von beiden Lichtern erhellt sind. Erscheinen nun bei gleicher Entfernung der Lichter von der Wand die Schatten des Stäbchens gleich hell, so besitzen die beiden Lichter gleiche Leuchtkraft. Ist aber ein Schatten heller beleuchtet als der andere, so entferne man das stärker leuchtende Licht so weit von der Wand, bis beide Schatten gleich hell erscheinen. Die Leuchtkräfte der beiden Lichter verhalten sich dann zu einander wie die Quadrate ihrer Entfernung von der Wand.

Wenn eine Fläche von den Lichtstrahlen nicht senkrecht getroffen wird, so ist unter sonst gleichen Umständen der Grad der Beleuchtung dem Sinus des Winkels proportional, welchen der Lichtstrahl mit der erleuchteten Ebene macht. Ist ab der Durchschnitt einer Ebene, auf welche die Strahlen von einem entfernten leuchtenden Punkte schief auffallen, so erhält sie nicht mehr Licht als die senkrecht gegen die Strahlen gestellte Ebene ac.



Da sich also die Lichtmenge, welche von einem leuchtenden Punkte auf eine dunkele Fläche fällt, wie der Sinus des Einfallswinkels und umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung verhält, so läßt sich hieraus in jedem gegebenen Falle der Grad der Beleuchtung einer Fläche berechnen.

Ist die Lichtquelle nicht ein Punkt, sondern ein Körper, so hängt die Intensität der Beleuchtung einer Fläche sowohl von der absoluten Intensität des Lichts oder, was dasselbe ist, von der jedem Punkte eigenthümlichen Stärke des Lichts als auch von der Menge der leuchtenden Punkte oder von der scheinbaren Größe der leuchtenden Fläche ab. Hier ist die Intensität der Beleuchtung für jeden Punkt der be-

Digitized by Google

leuchteten Fläche besonders zu bestimmen und alsdann die Summe aller dieser Beleuchtungen zu berechnen.

14. Die Geschwindigkeit des Lichts wurde schon früh von O. Römer durch astronomische Beobachtungen bestimmt. Um den Planeten Jupiter bewegen sich nämlich vier Monde oder Trabanten, welche bei jedem Umlaufe einmal in den Schatten des Jupiter treten, wodurch sie vollständig verfinstert werden; nur der entfernteste geht zuweilen neben dem Schatten vorbei. Die Zeit, welche zwischen zwei auf einander folgenden Austritten eines und desselben Trabanten aus dem Schatten des Jupiter oder, was dasselbe ist, zwischen zwei nächsten Verfinsterungen liegt, ist die Umlaufszeit dieses Trabanten. Auf diese Weise hat man für den Mond, welcher dem Jupiter am nächsten ist, eine Umlaufszeit von 42 Stunden, 28 Minuten und 35 Secunden beobachtet. Hat man also in einem bestimmten Augenblicke einen Austritt beobachtet, so läßt sich jeder folgende leicht berechnen. Wenn sich nun aber die Erde in ihrer jährlichen Bewegung dem Jupiter nähert, so beobachtet man, daß der Austritt des Mondes aus dem Schatten früher erfolgt, während er umgekehrt bei der Entfernung der Erde vom Jupiter später stattfindet. Dies rührt nur daher, daß das Licht, welches der Mond von der Sonne erhält, in dem Verhältnisse weniger oder mehr Zeit braucht, um von ihm zur Erde zu gelangen, als die letztere in ihrer Bahn weniger oder mehr von ihm entfernt ist. Befindet sich die Erde in ihrer größten Entfernung vom Jupiter, so bemerkt man den Austritt 16 Minuten später, als es der Rechnung zufolge geschehen sollte. Dies ist also die Zeit, welche das Licht braucht, um die Entfernung zu durchlaufen, um welche die Erde jetzt weiter vom Jupiter absteht als zur Zeit der Conjunction oder ihres kleinsten Abstandes vom Jupiter. Die eben erwähnte Entfernung ist gleich dem Durchmesser der Erdbahn, welchen also das Licht in 16′ durchläuft, woraus sofort folgt, daß es den Halbmesser der Erdbahn oder den Raum von der Sonne zur Erde in 8′ zurücklegt. Die Geschwindigkeit des Lichts ergiebt sich hiernach ohne Weiteres zu etwa 42000 Meilen in 1 Secunde.

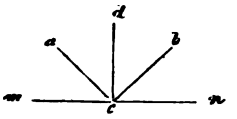
Zweites Kapitel.

Von der Reflexion oder Spiegelung des Lichts.

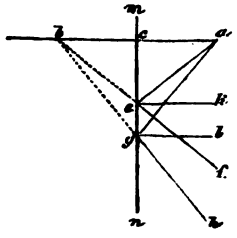
15. Wir haben schon im vorigen Kapitel erwähnt, daß ein Lichtstrahl, sobald er die Trennungsfläche zweier ungleichartiger Mittel

Digitized by Google

trifft, reflectirt wird. Ist nun ac ein Lichtstrahl, welcher in c auf einen Spiegel mn fällt, so wird er nach der Richtung cb dergestalt zurückgeworfen, daß die Winkel acd und dcb, welche der einfallende und zurückgeworfene Strahl mit dem Lothe cd machen, einander gleich sind. Beide Strahlen liegen mit diesem Lothe in einer und derselben Ebene. Dies sind die Gesetze der Reflexion des Lichts. Uebrigens hat man solches regelmäßig reflectirte Licht von dem unregelmäßig reflectirten oder zerstreuten Lichte zu unterscheiden. Unsere Spiegel geben das Bild des Gegenstandes, welcher ihnen Licht zusendet, indem sie die auffallenden Strahlen auf die obige Weise regelmäßig reflectiren, und die Intensität dieses reflectirten Lichts ist um so größer, je feiner die Politur ihrer Oberfläche ist. Ein Spiegel von absolut glatter Oberfläche würde uns nur das Bild des vor ihm stehenden Gegenstandes in einer bestimmten Richtung zeigen, ohne selbst sichtbar zu sein. Die verschiedenen Theilchen eines Körpers nehmen wir aber nur insofern wahr, als sie das erhaltene Licht nach allen Richtungen zerstreuen, was um so besser von Statten geht, je rauher die spiegelnde Oberfläche ist.



Nach den obigen Reflexionsgesetzen läßt sich leicht die Lage des Bildes bestimmen, welches ein Spiegel von einem vor seiner Ebene liegenden Gegenstande zeigen muß. Es sei mn ein ebener Spiegel, welcher von dem Punkte a die Lichtstrahlen ae, ag erhält. Dann sind ef, gh die reflectirten Strahlen, deren Richtungen man leicht erhält, wenn man in e und g Perpendikel errichtet und Winkel kef = aek, lgh = agl macht. Eine vom Punkte a auf mn gezogene Senkrechte mag hinter dem Spiegel von der Verlängerung des Strahles fe im Punkte b geschnitten werden. Nun ist ce = ce, ace = bce, aem = nef = bem, also das Dreieck bec congruent dem Dreiecke aec, woraus weiter cb = ca folgt. Hiernach erscheint dem Auge das Bild des leuchtenden Punktes a so, als ob die reflectirten Strahlen von einem Punkte b herkämen, der eben so weit hinter dem Spiegel als der leuchtende Punkt vor demselben liegt. Dasselbe gilt auch von den verschiedenen Punkten eines leuchtenden Gegenstandes, so daß es weiter keine Schwierigkeit hat, das Bild eines solchen Gegenstandes zu construiren. —



Digitized by Google

Wenn zwei Spiegel unter einem Winkel zusammenstoßen, so müssen von einem zwischen ihnen befindlichen Gegenstande mehrere Bilder sichtbar werden. Denn jeder Spiegel giebt für sich ein Bild des Gegenstandes und die hierbei von dem einen Spiegel reflectirten Strahlen können wieder am anderen zur Reflexion gelangen und dadurch ein neues Bild erzeugen. Da die wiederholt reflectirten Strahlen jedesmal einen der beiden Spiegel treffen müssen, wenn ein neues Bild entstehen soll, so ist klar, daß die Anzahl der auf diese Weise hervorgebrachten Bilder vom Neigungswinkel der beiden Spiegel abhängt. Bezeichnet man durch n die Anzahl der Grade dieses Winkels, so ist die Anzahl der erzeugten Bilder $\frac{360^0}{n}$, wenn man den Gegenstand selbst mitrechnet. Ist aber der Neigungswinkel gleich 0, d. h. befindet sich der Gegenstand zwischen zwei parallelen Spiegeln, so wird das Bild desselben in dem einen Spiegel jedesmal wieder zum Object für den anderen, so daß hier die Zahl der Bilder im Grunde unbegrenzt ist; doch haben nur die ersteren eine solche Lichtstärke, daß sie deutlich wahrgenommen werden können.

16. Auf den Reflexionsgesetzen des Lichts beruhen viele physikalische Instrumente.

Eines der bekanntesten ist das sogenannte Reflexionsgoniometer, welches man zur Messung des Winkels braucht, den zwei Krystallflächen mit einander machen. Man legt den Krystall so, daß die eine der beiden Flächen, deren Winkel gemessen werden soll, das Bild eines entfernten Gegenstandes nach einer bestimmten Stelle, (z. B. des Fußbodens) reflectirt. Alsdann dreht man den Krystall um die betreffende Kante so, daß die andere Fläche das Bild desselben Gegenstandes an derselben Stelle des Bodens zeigt, was geschehen wird, sobald sich diese Fläche in derselben Lage wie die erste befindet. Kennt man nun den Drehungswinkel, welcher sich mittelst eines Höhenkreises, dessen Axe jener Kante parallel ist, bestimmen läßt, so erhält man durch Subtraction desselben von 180° den Winkel der beiden Krystallflächen.

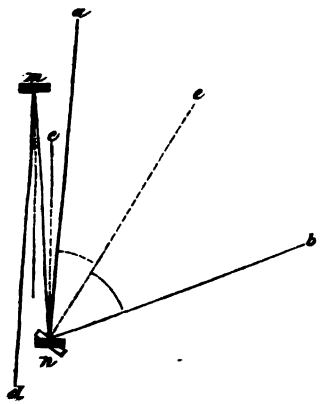
Von den besonders zum Behufe dieser Messung construirten Instrumenten ist das Gambay'sche Goniometer namentlich für große und schwere Krystalle geeignet. Es besteht im Wesentlichen aus einem Fernrohre, welches mit einer Säule, die oben einen getheilten Kreis trägt, auf demselben Stative befestigt ist. Nachdem das Fernrohr festgestellt ist, legt man den Krystall so auf die Säule, daß das Bild eines entfernten Gegenstandes von der einen Fläche reflectirt im

Digitized by Google

Fadenkreuze des Fernrohres erscheint. Dreht man hierauf den Krystall so, daß das Bild des Gegenstandes durch Reflexion von der anderen Fläche ebenfalls im Fadenkreuze erscheint, so läßt sich die Größe der Drehung am getheilten Kreise ablesen und nach dem Obigen auch der Winkel der beiden Krystallflächen bestimmen.

Das bekannte Winkelmeßinstrument, der Spiegelsextant, beruht gleichfalls auf den Reflexionsgesetzen des Lichts. Derselbe besteht aus zwei Spiegeln, von denen der eine auf der Ebene eines in Grade getheilten Kreises von 60° befestigt ist, während der andere sich im Mittelpunkte dieses Kreisbogens auf einer Scheibe befindet, welche um eine verticale Axe drehbar ist. Der erste (feste) Spiegel ist auf seiner oberen Fläche nur zur Hälfte belegt, so daß das Auge durch den unbelegten Theil desselben nach entfernten Gegenständen sehen kann. Die spiegelnde Fläche des zweiten ist aber den Gegenständen zugekehrt, worauf sich die Winkelmessung bezieht. Mit der erwähnten Scheibe des beweglichen Spiegels ist ein Stab verbunden, welcher während der Drehung dieses Spiegels die Theilung des Kreises durchläuft. Auch befindet sich zur genaueren Ablesung am Ende des Stabes noch ein Nonius. Das Instrument ist mit einem Handgriffe versehen, der oben eine Messingscheibe mit einem Loche trägt, vermittelst dessen man durch den unbelegten Theil des ersten Spiegels einen entfernten Gegenstand sehen kann. Bei Spiegelsextanten, welche zu genaueren Messungen dienen sollen, befindet sich an der Stelle jenes Loches ein Fernrohr. Die Messung selbst beruht aber auf folgendem Princip.

Es sei m der nur zum Theil belegte Spiegel, so daß das Auge bei d durch seine unbelegte Hälfte hindurch sehen kann; n sei der zweite vollständige Spiegel, der sich um seine Mitte drehen läßt. Ist nun der letztere Spiegel parallel mit dem ersteren so gestellt, daß ein von einem entfernten Gegenstande kommender, bei m vorbeigehender Lichtstrahl a n von ihm nach m reflectirt wird, so erblickt das Auge in d einmal den Gegenstand direct durch den unbelegten Theil und dann auch noch das Bild desselben in der belegten Hälfte des Spiegels m. Dreht man aber den Spiegel n um seine Axe,



Digitized by Google

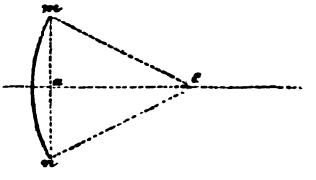
so daß er etwa in die Lage kommt, welche die Figur andeutet, so kann der Strahl a n nicht mehr nach m reflectirt werden, wohl aber der von einem anderen Gegenstande kommende Strahl b n. Man gewahrt also nunmehr in der belegten Hälfte des Spiegels das Bild dieses anderen Gegenstandes, während man den ersten Gegenstand noch direct durch den unbelegten Theil desselben sieht. Der Winkel nun, um den man den Spiegel n aus seiner ursprünglichen Lage drehen muß, damit man in dem belegten Theile des Spiegels m das Bild des zweiten Gegenstandes wahrnimmt, während man durch den anderen Theil fortdauernd den ersten Gegenstand sieht, ist die Hälfte des Winkels, welchen die nach den beiden Gegenständen gezogenen Visirstrahlen a n und b n mit einander machen. Bei der ursprünglichen oder parallelen Lage beider Spiegel ist c n das Einfallsloth und daher die Winkel a n c und m n c, welche die Strahlen a n und m n mit diesem Lothe bilden, einander gleich. Dreht man aber den Spiegel n, so muß sich nothwendiger Weise auch die Lage des Einfallslothes ändern, und zwar um eben so viele Grade, als der Spiegel aus seiner anfänglichen Lage herausgedreht worden ist. Sei nun für die neue Lage des Spiegels e n das Einfallsloth; dann sind b n e und e n m die beiden gleichen Winkel, welche die Strahlen a n und n m mit dem Lothe e n machen. Da aber der Winkel a n b = m n e + e n b — (m n c + c n a) = 2 m n e — 2 m n c und Winkel c n e = m n e — m n c ist, so sieht man, daß der Winkel a n b, welchen die nach den beiden Gegenständen gezogenen Visirstrahlen mit einander machen, doppelt so groß ist als der Winkel c n e der Einfallslothe, um welchen der Spiegel n gedreht worden ist. Auf diesem Satze beruht nun eben die Winkelmessung mit dem Sextanten.

Hierher gehören auch der Heliostat und Gauß's Heliotrop, von denen der erstere zu manchen optischen Versuchen, der letztere aber namentlich bei geodätischen Operationen zu Signalen zweckmäßig gebraucht werden kann. Der Heliostat ist ein Planspiegel, welcher sich durch ein mit ihm in Verbindung stehendes Uhrwerk so bewegen läßt, daß die auf ihn fallenden Sonnenstrahlen, ungeachtet des veränderlichen Standes der Sonne, stets nach derselben Richtung reflectirt werden. — Das Heliotrop ist aus zwei auf einander senkrechten Planspiegeln, welche noch mit einem Fernrohre verbunden sind, zusammengesetzt. Die Sonnenstrahlen, welche auf diese Spiegel fallen, werden nach parallelen, aber entgegengesetzten Richtungen reflectirt. Vermittelst des einen dieser Spiegel wird dem Apparate die gehörige Stellung gegeben, während der andere den Zweck hat,

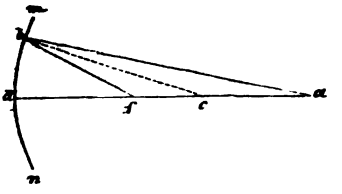
Digitized by Google

das Bild der Sonne nach einem bestimmten, weit entfernten Orte zu werfen.

17. Wir wollen nun die Gesetze der Reflexion auf sphärisch gekrümmten Spiegeln näher betrachten. Man erhält solche Spiegel, wenn man sich von einer Hohlkugel ein Stück durch eine Ebene abgeschnitten denkt. Je nachdem nun die hohle oder erhabene Seite die spiegelnde Oberfläche bildet, nennt man die sphärischen Spiegel concav oder conver.



Die Figur zeigt den Durchschnitt eines Hohlspiegels, wo c der Krümmungsmittelpunkt, die durch die Mitte des Spiegels gehende Linie ca die Axe und der Winkel mcn die Oeffnung des Spiegels ist.



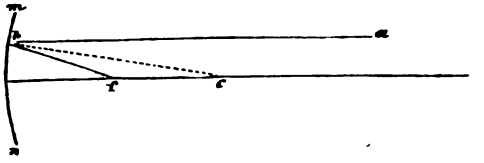
Befindet sich in a ein leuchtender Punkt, so ist die Gerade ad, welche durch den Mittelpunkt c der Krümmung geht, die Axe des Strahlenkegels, den der Hohlspiegel mn empfängt. Der Strahl ab wird in der Richtung bf reflectirt, so daß, wenn cb das Einfallsloth, der Winkel abc gleich dem Winkel fbc ist. Alle Strahlen, welche den Spiegel in Punkten treffen, die mit b in demselben Kreisumfange liegen, müssen nach der Reflexion im Punkte f vereinigt werden. Man setze cd — 2p, ad — a und fd — α. Aus dem Dreiecke abf erhält man in Folge der Halbirung des Winkels abf durch cb die Proportion ab : bf — ac : cf. Ist nun der Winkel bcd sehr klein, was wir hier voraussetzen wollen, so lassen sich ohne merklichen Fehler die Linien ab und ad, wie auch fd und fb als gleich lang betrachten. Demnach haben wir auch ab — a und fb — α, so daß jene Proportion, wenn man die Buchstabenwerthe einführt, giebt a : α — a — 2p : 2p — α oder a (2p — α) — α (a — 2p) oder ap + αp — aα und hieraus durch Division mit aαp : $\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{a} = \frac{1}{p}$, woraus weiter folgt

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{p} - \frac{1}{a} \text{ und } \alpha = \frac{ap}{a-p}.$$

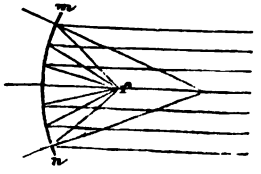
Setzt man in dieser Formel a — ∞, d. h. kommen die Strahlen von einem unendlich entfernten Punkte, so daß sie in paralleler Rich-

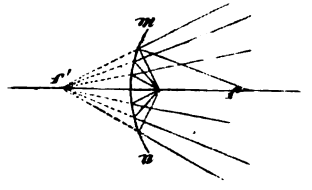
Digitized by Google

tung auf den Hohlspiegel fallen, so ist $\alpha = p$ oder die Strahlen vereinigen sich nach der Reflexion in einem Punkte f, der in der Mitte zwischen dem Mittelpunkte des Spiegels und dem letzteren selbst liegt.

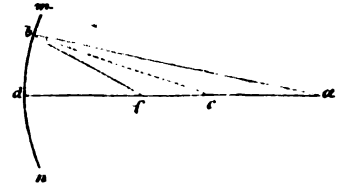


Man nennt diesen Punkt den Hauptbrennpunkt und seine Entfernung vom Spiegel die Brennweite. Je kleiner a, desto größer wird α, nämlich je mehr sich der leuchtende Punkt dem Spiegel nähert oder je divergirender die Strahlen auffallen, desto mehr rückt der Brennpunkt f der Strahlen vom Spiegel hinweg. Setzt man $r = 2p$, so wird auch $\alpha = 2p$, d. h. wenn der leuchtende Punkt im Mittelpunkte des Spiegels steht, so fallen alle Strahlen senkrecht auf den Spiegel und werden daher auch wieder nach dem Mittelpunkte reflectirt. Rückt der leuchtende Punkt dem Spiegel noch näher, so vereinigen sich die reflectirten Strahlen erst jenseits des Mittelpunktes. Ist endlich $a = p$, so hat man nach der obigen Formel $\alpha = \infty$, d. h. wenn der leuchtende Punkt im Brennpunkte selbst steht, so werden die Strahlen parallel mit der Are reflectirt. Für $a < p$, in welchem Falle sich der leuchtende Punkt zwischen dem Spiegel und dem Hauptbrennpunkte befindet, erhält α einen negativen Werth, welcher anzeigt, daß die Strahlen so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte f' hinter dem Spiegel herkämen.





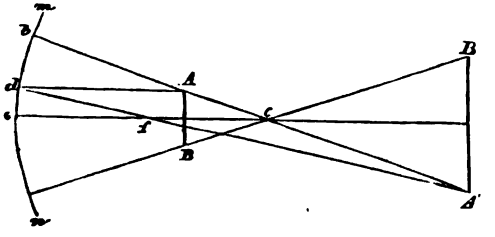
Das bisher Gesagte gilt nur für Strahlen, welche der Are sehr nahe auf den Hohlspiegel fallen. Je größer der Winkel bcd, also auch der Winkel bad ist, desto näher kommt, wie man sogleich einsieht, der Brennpunkt f bei d zu liegen. Für parallele Strahlen liegt auch der Hauptbrennpunkt nur unter der Voraussetzung einer kleiner Oeffnung des Spiegels in der Mitte zwischen dem Krümmungsmittel-



Digitized by Google

punkte und dem Spiegel selbst. In dem Falle nun, daß die von einem leuchtenden Punkte ausgehenden Strahlen nach der Reflexion nicht in einem Punkte vereinigt werden, können sich je zwei nächste reflectirte Strahlen schneiden, so daß hierdurch eine sogenannte kaustische Linie oder Brennlinie entsteht. Alle durch eine spiegelnde krumme Oberfläche erzeugten Brennlinien bilden wieder zusammen eine kaustische Fläche, in deren Nähe natürlich die Intensität des Lichts am größten ist. Man kann dies deutlich an der herzförmigen Linie sehen, die sich innerhalb eines cylindrischen Gefäßes oder Ringes bildet, wenn diese Gegenstände vom Sonnenlichte oder von dem Lichte einer Flamme stark beleuchtet werden.

18. Aus den vorhergehenden Betrachtungen erhellt, daß die von einem leuchtenden Gegenstande ausgehenden Strahlen nach der Reflexion von einem Hohlspiegel ein Bild des Gegenstandes gewähren müssen. Befinde sich der Gegenstand AB zwischen dem Krümmungsmittelpunkte c und dem Brennpunkte f. Der vom Punkte A senkrecht auf den Spiegel fallende Strahl Ab wird in der Richtung bA, der mit der Axe parallele Strahl Ad aber nach dem Brennpunkte f hin reflectirt. Beide Strahlen schneiden sich in A', wo also auch das Bild des Punktes A ist. Auf ähnliche Weise ergiebt sich das Bild des Punktes B in B'. Von einem Gegenstande zwischen dem Brennpunkte f und dem Krümmungsmittelpunkte c erhält man mithin durch einen solchen Spiegel ein umgekehrtes, vergrößertes Bild jenseits des Mittelpunktes c. Wäre dagegen A'B' der Gegenstand, so sieht man sogleich, daß die von ihm ausgehenden Strahlen nach der Reflexion das Bild AB erzeugen werden, so daß also ein Gegenstand jenseits des Mittelpunktes c ein verkehrtes, verkleinertes Bild zwischen dem Brennpunkte und dem Mittelpunkte giebt. Die Größe des Bildes A'B' ergiebt sich aus der Proportion A'B' : AB = cA' : cA.

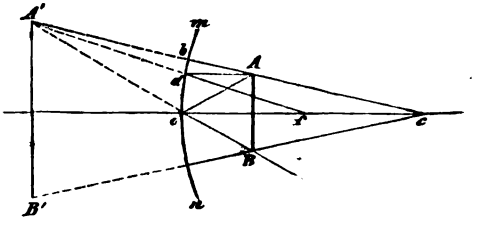


Da diese Bilder durch wirkliche Vereinigung der reflectirten Lichtstrahlen entstehen, so kann man sie auf einem Schirme von weißem Papiere oder mattgeschliffenem Glase auffangen, wo sie dann ihr Licht gleich dem leuchtenden Gegenstande nach allen Richtungen ver-

Digitized by Google

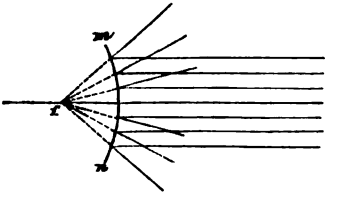
breiten. Man nennt daher diese Bilder auch zum Unterschiede von anderen Sammelbildern.

Befindet sich der Gegenstand AB zwischen dem Spiegel und dem Brennpunkte f, so entsteht sein Bild A′B′ hinter dem Spiegel. Denn der senkrecht auf den Spiegel fallende Strahl Ab wird in der Richtung bAc, der mit der Axe parallele Ad aber



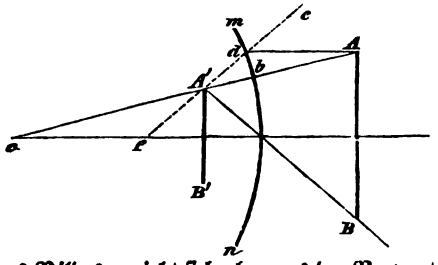
nach dem Brennpunkte f reflectirt; beide Strahlen divergiren nach der Reflexion und können sich nur rückwärts verlängert im Punkte A′ schneiden, der also das Bild von A ist. Auf dieselbe Weise zeigt sich das Bild von B im Punkte B′. Ein Gegenstand zwischen dem Brennpunkte und dem Spiegel giebt also hinter dem letzteren ein aufrechtes, vergrößertes Bild, welches natürlich kein Sammelbild sein kann.

19. Bei Conversspiegeln giebt es keinen Punkt, in welchem die Strahlen nach der Reflexion wirklich vereinigt werden. Die Formel im §. 17 gilt auch für Conversspiegel, wenn man nur p negativ nimmt. Man erhält dann $\frac{1}{\alpha} = -\frac{1}{p} - \frac{1}{a} = -\left(\frac{1}{p} + \frac{1}{a}\right)$. Diese Formel giebt für jeden positiven Werth von a einen negativen für α, was die Bedeutung hat, daß die auf den Conversspiegel fallenden Strahlen so reflectirt werden, als ob sie von einem Punkte hinter dem Spiegel kämen. Treffen die Strahlen den Spiegel in parallelen Richtungen, so divergiren sie nach der Reflexion



so, als ob sie von dem eingebildeten Brennpunkte f herkämen, welcher, wie der wirkliche Brennpunkt in Concavspiegeln, in der Mitte zwischen dem Spiegel und dem Krümmungspunkte liegt. Ist AB (s. folgende Figur) ein Gegenstand vor dem Conversspiegel mn, so wird der senkrecht auf den letzteren fallende Strahl Ab in der Richtung bA zurückgeworfen, während der mit der Axe parallele Ad nach de so reflectirt wird, als ob er von dem eingebildeten Brennpunkte f herkäme. Die reflectirten Strahlen Ad und Ab schneiden sich rückwärts verlängert im Punkte A′, wo also dem Auge das Bild des Punktes A

Digitized by Google



erscheinen wird. Auf ähnliche Weise erhält man die Bilder der übrigen Punkte des leuchtenden Gegenstandes AB. Ein Converspiegel giebt also aufrechte, verkleinerte Bilder hinter dem Spiegel. Die jedesmalige Größe des Bildes ergiebt sich aber aus der Proportion A'B' : AB = A'c : Ac. —

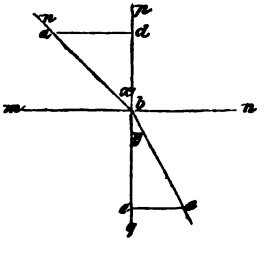
Spiegel, die theils eben, theils gekrümmt sind, z. B. Cylinder- und Kegelspiegel, zeigen nicht, wie sphärische Spiegel, regelmäßige Bilder. Einen Cylinderspiegel kann man der Länge nach als eben, der Breite nach als conver oder concav betrachten, je nachdem die äußere oder innere Seite die spiegelnde Oberfläche bildet; in ihm erscheinen die Bilder in verjüngter oder vergrößerter Breite. Da bei einem Kegelspiegel die Convexität gegen die Spitze hin beständig zunimmt, so müssen in ihm die Bilder nach oben hin fortwährend an Breite abnehmen. Umgekehrt können auf gewisse Weise verzerrte Gegenstände in einem solchen Spiegel in der regelmäßigsten Form erscheinen.

Drittes Kapitel.

Von der Brechung des Lichts.

20. Wir wissen schon, daß ein Lichtstrahl, wenn er aus einem durchsichtigen Mittel in ein anderes übergeht, in dem letzteren eine Richtungsänderung erleidet, welche man Ablenkung oder vielmehr Brechung des Lichts nennt.

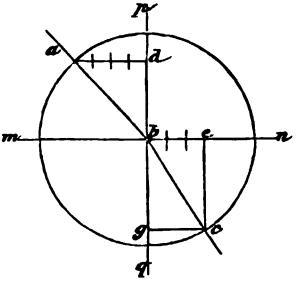
Es sei mn die Trennungsebene zweier durchsichtiger Mittel von verschiedener Beschaffenheit; auf diese Ebene falle in schräger Richtung ein Strahl ab. Zieht man im Punkte b ein Loth pq, so wird der gebrochene Strahl bc mit diesem Lothe einen bestimmten Winkel bilden, welchen man den Brechungswinkel nennt, während der Winkel, den der Strahl ab mit demselben Lothe macht, Einfallswinkel genannt wird. Beide Strahlen, der einfallende und gebrochene, liegen in einer



Digitized by Google

und derſelben Ebene. Dies iſt das erſte Geſetz der Brechung. Man mache bc = ab und ziehe ad und ce ſenkrecht auf das Loth pq; dann iſt ad der Sinus des Einfallswinkels x und ce der Sinus des Brechungswinkels y. Das Verhältniß dieſer Sinus iſt nun, ſo lange das brechende Mittel daſſelbe bleibt, unveränderlich und unabhängig von der Neigung des einfallenden Strahles gegen das Einfallsloth, ſo daß $\frac{\sin x}{\sin y} = n$, wo n als Exponent dieſes Verhältniſſes eine conſtante Zahl bezeichnet. Dies iſt das zweite Hauptgeſetz der Lichtbrechung.

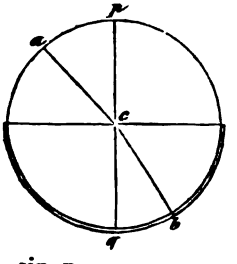
Iſt nun das Brechungsverhältniß bekannt, ſo hat es keine Schwierigkeit, den Weg zu beſtimmen, welchen der Lichtſtrahl nach der Brechung einſchlagen wird. Geht z. B. ein Lichtſtrahl aus Luft in Waſſer über, ſo iſt der Brechungsexponent n nahe $^4/_3$. Es ſei mn eine Waſſeroberfläche, welche im Punkte b von dem Strahle ab getroffen wird. Man ziehe das Einfallsloth pq und beſchreibe um den Punkt b mit ab einen Kreis, fälle dann ad ſenkrecht auf pq und theile dieſe Senkrechte in 4 gleiche Theile. Trägt man nun von dieſen Theilen 3 von b bis e und zieht man von dem ſo beſtimmten Punkte e die Linie ec parallel zu pq, ſo iſt bc die Richtung des gebrochenen Lichtſtrahles im Waſſer, da $\frac{ad}{cg} = \frac{4}{3}$. Geht aber der Lichtſtrahl cb bei b aus dem Waſſer in die Luft über, ſo wird er nach der Richtung ba gebrochen, ſo daß nunmehr das Brechungsverhältniß $\frac{cg}{ad} = \frac{3}{4}$ iſt.



Wenn allgemein n der Brechungsexponent für den Uebergang des Lichts aus einem Mittel in ein anderes iſt, ſo iſt für den Uebergang des Lichts aus dem letzteren Mittel in das erſtere der Brechungsexponent $\frac{1}{n}$.

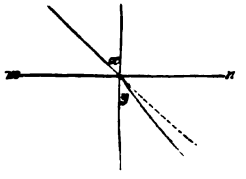
Um die Hauptgeſetze der Lichtbrechung durch den Verſuch zu prüfen, kann man ſich eines zuerſt von Carteſius gebrauchten Inſtrumentes bedienen, welches aus einem halbkugelförmigen, mit einem getheilten Kreiſe verſehenen Gefäße beſteht. Füllt man dieſes Gefäß bis zum Mittelpunkte mit einer Flüſſigkeit und läßt gerade auf den Mittelpunkt c ein feines Bündel Sonnenlicht fallen, ſo wird letzteres an irgend einer Stelle der Gefäßwand, wo es wieder in die Luft

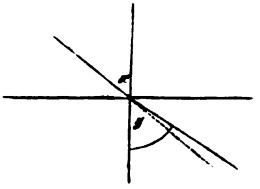
Digitized by Google

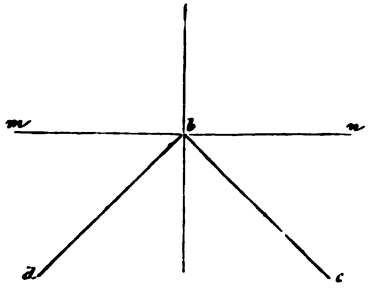


austritt, einen hellen Fleck hervorbringen. Man kann dann an der Kreistheilung sowohl den Einfallswinkel acp als auch den Brechungswinkel bcq ablesen, und sich überzeugen, daß der einfallende Strahl mit dem gebrochenen in derselben Ebene liegt.

Nach dem Obigen findet das Brechungsgesetz seinen Ausdruck in der Formel $\frac{\sin x}{\sin y} = n$, wenn x der Einfallswinkel, y der Brechungswinkel und n der Brechungsexponent ist. Ist der Einfallswinkel x gleich 0, so ist auch y gleich 0, d. h. wenn der Strahl senkrecht auf die Oberfläche eines Mittels fällt, so geht er ungebrochen hindurch. Für $n > 1$ ist $\sin x > \sin y$, daher auch $x > y$. In diesem Falle, wo also der Brechungswinkel kleiner als der Einfallswinkel ist, pflegt man zu sagen, daß der Strahl gegen das Einfallsloth zu gebrochen werde. Ist aber $n < 1$, so ist $\sin x < \sin y$, deshalb auch $x < y$, und man sagt, der Strahl werde vom Einfallslothe hinweggebrochen. Der größte Einfallswinkel ist der von 90°, für welchen $\sin x = 1$ und $\sin y = \frac{1}{n}$. Nehmen wir an, daß ein Lichtstrahl unter diesem Winkel aus Luft in Wasser übergeht, so ist $\sin y = \frac{3}{4} = 0{,}75$, wozu der Winkel von 48° 35′ gehört, welcher also die Richtung des gebrochenen Strahles angiebt. Kommt umgekehrt ein Lichtstrahl unter dem Winkel von 48° 35′ aus dem Wasser hervor, so macht er in der Luft einen Winkel von 90° mit dem Einfallslothe oder er bewegt sich längs der Oberfläche bm des Wassers fort. Bekanntlich giebt es keinen Sinus, welcher größer als 1 ist; übersteigt daher für eine gewisse Größe des Einfallswinkels der Sinus des Brechungswinkels die



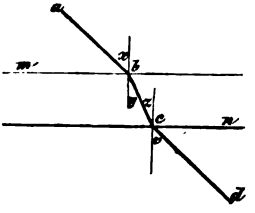




Digitized by Google

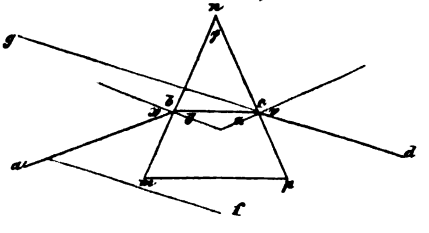
Einheit, so wird der Brechungswinkel selbst imaginär, d. h. es findet für diesen Fall kein Uebergang des Lichtstrahles aus dem einen Mittel in das andere statt, sondern derselbe wird an der Trennungsfläche beider Mittel, wie von einer Spiegelfläche, zurückgeworfen. Macht also ein Lichtstrahl cb, während er sich im Wasser bewegt, einen Winkel mit dem Einfallslothe, welcher größer als 48° 35′ ist, so wird er an der Oberfläche des Wassers nach der Richtung bd vollständig reflectirt. Man kann diese Erscheinung wahrnehmen, wenn man ein Trinkglas mit Wasser füllt, einen Schlüssel hineinstellt und von unten schief hinauf sieht.

Wenn das Licht aus Luft in Glas übergeht, so ist das Brechungsverhältniß $\frac{\sin x}{\sin y} = \frac{3}{2}$. Es sei nun mn eine Glasplatte mit parallelen Oberflächen, auf welche ein Lichtstrahl ab unter dem Winkel x fällt; dann läßt sich nach der Formel leicht der Brechungswinkel y und daher auch die Richtung des gebrochenen Strahles bc bestimmen. Wenn man in c das Einfallsloth errichtet, so ist offenbar der Winkel z = y und da hier das Licht wieder in die Luft übergeht,



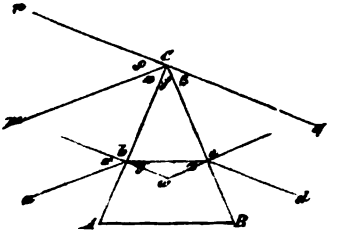
also das Brechungsverhältniß $\frac{\sin z}{\sin v} = \frac{2}{3}$ das umgekehrte von dem obigen ist, so hat man Winkel v = x, woraus folgt, daß der aus der Glasplatte tretende Lichtstrahl cd parallel mit dem einfallenden ab ist. Ebenso läßt sich nachweisen, daß ein Lichtstrahl, welcher durch mehrere Körper mit parallelen Grenzflächen geht, seiner ursprünglichen Richtung parallel austritt.

21. Auf dieselbe Weise kann man auch die Richtung eines Lichtstrahles bestimmen, welcher auf ein Mittel fällt, das von zwei gegen einander geneigten Ebenen begrenzt wird, sofern nur das Brechungsverhältniß bekannt ist. Es falle der Lichtstrahl ab auf ein Glasprisma, dessen Durchschnitt mnp sein mag. Der Einfallswinkel x ergiebt sich sogleich, wenn man in b auf mn das Einfallsloth errichtet, während sich der Brechungswinkel y aus $\frac{\sin x}{\sin y} = \frac{3}{2}$



Digitized by Google

bestimmt. Bei c trifft der Strahl die gegenüber stehende Grenzebene des Prisma's; errichtet man daher in c abermals ein Einfallsloth, so hat man den Einfallswinkel z, und da hier der Strahl wieder aus Glas in Luft übergeht, also daselbst eine zweite Brechung statt findet, so hat man den Brechungswinkel v aus $\frac{\sin z}{\sin v} = \frac{2}{3}$, womit zugleich die Richtung des austretenden Lichtstrahles cd gegeben ist. Die Ablenkung aber, welche der Strahl durch das Prisma erleidet, erfährt man durch den Winkel, welchen der einfallende Strahl ab mit dem austretenden cd macht. Zieht man daher die Linie af parallel zu cd, so ist der Winkel fab diese Ablenkung. Man bemerkt, daß Gegenstände, durch ein Prisma betrachtet, bedeutend von ihrem wirklichen Orte verrückt erscheinen. Befindet sich das Auge bei d, so wird es den Punkt a in der Richtung dc, d. h. in g wahrnehmen. In unserem Falle, wo der brechende Winkel des Prisma's nach oben gerichtet ist, scheint also der Gegenstand gehoben; dagegen scheint er erniedrigt, wenn der brechende Winkel nach unten gerichtet ist. Zugleich erscheinen die Gegenstände, durch ein Prisma betrachtet, mit farbigen Säumen. Von den Farbenerscheinungen, welche man durch ein Prisma wahrnimmt, wird später ausführlicher die Rede sein. Die Ablenkung des Lichts hängt sowohl von dem brechenden Winkel γ als auch von der brechenden Substanz des Prisma's ab. Auch kann man sich überdies durch den Versuch leicht überzeugen, daß die Größe der Ablenkung durch die Richtung bedingt ist, in welcher der Lichtstrahl das Prisma trifft. Die Ablenkung ist am kleinsten, wenn die Linien ab und cd mit den Seiten des Prisma's gleiche Winkel bilden oder auch wenn die Winkel y und z, welche der gebrochene Strahl bc mit den in b und c errichteten Einfallslothen macht, einander gleich sind. Der Winkel der kleinsten Ablenkung ist besonders bequem, um das Brechungsverhältniß verschiedener Stoffe zu bestimmen, wenn nur außerdem noch der brechende Winkel des Prisma's bekannt ist. Zieht man durch die Spitze C die Linien mC und pq parallel mit ab und cd, so ist nach dem Obigen mCp = δ der Ablenkungswinkel, so daß man hat $\delta = 180^0 - \alpha - \gamma - \beta$. Nun ist α gleich dem Winkel Aba = $90^0 - x$ und, da $\beta = \alpha$, auch $\beta = 90^0 - x$; folglich, wenn man substituirt, $\delta = 2x - \gamma$ und



Digitized by Google

$x = \frac{\delta + \gamma}{2}$. Die Winkel ω und γ liegen in einem Vierecke, deſſen Winkel zuſammen 360° ausmachen, einander gegenüber; man hat alſo $\gamma + \omega = 180°$ oder, weil in dem durch bc und die beiden Einfallslothe gebildeten Dreiecke $\omega = 180° - y - z = 180° - y - y$ iſt, $\gamma = y + y$ und $y = \frac{\gamma}{2}$. Nach früheren Betrachtungen iſt der Brechungsexponent $n = \frac{\sin x}{\sin y}$, alſo, wenn man für x und y die erhaltenen Werthe ſetzt, $n = \frac{\sin \frac{\delta + \gamma}{2}}{\sin \frac{\gamma}{2}}$, eine Formel, welche zur Beſtimmung des Brechungsexponenten ſehr geeignet iſt.

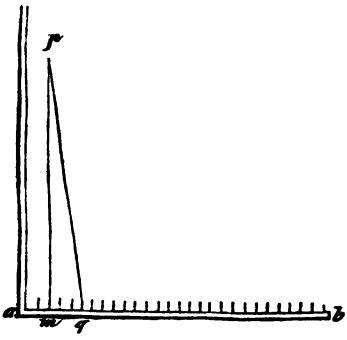
22. Will man nun den Brechungsexponenten eines feſten Körpers beſtimmen, ſo bilde man aus demſelben ein Prisma und ſuche mit Hilfe des früher erwähnten Goniometers den brechenden Winkel deſſelben. Man ſtelle alsdann das Prisma auf eine Platte, welche vor dem Objectivglaſe eines mit einem Höhenkreiſe verſehenen Fernrohres angebracht iſt. Dieſe Platte iſt drehbar und durch Drehung derſelben wird auch das Prisma um ſeine verticale Are gedreht. Sieht man nun im Fernrohre das gebrochene Bild eines entfernten Punktes, welcher ſein Licht auf das Prisma ſendet, ſo kann man es durch Drehung des letzteren leicht dahin bringen, daß der einfallende Lichtſtrahl ſeinen Weg in einem auf die Seitenflächen des Prisma's ſenkrechten Querſchnitte nimmt, für welchen Fall der Lichtſtrahl die geringſte Ablenkung von ſeiner urſprünglichen Richtung erfährt. Nimmt man dann das Prisma weg und richtet das Fernrohr direct auf den entfernten Punkt, ſo findet ſich am getheilten Kreiſe der Winkel, welchen die jetzige Lage des Fernrohres mit der vorigen macht. Durch dieſen Winkel erhält man die kleinſte Ablenkung γ des durch das Prisma gehenden Strahles. Der Brechungsexponent n ergiebt ſich aber aus der obigen Formel, wenn man die für δ und γ gefundenen Werthe ſubſtituirt.

Ebenſo kann man auch den Werth von n für Flüſſigkeiten beſtimmen, wenn man ſie in ein Hohlprisma bringt, das aus Glasplatten mit ſehr parallelen Oberflächen zuſammengeſetzt iſt. Statt deſſen kann man aber auch ein Glasprisma durchbohren, dergeſtalt, daß ein von der einen Seitenfläche nach der anderen hinübergehendes

Digitized by Google

Loch entſteht. Dieſes Loch füllt man mit der Flüſſigkeit, deren Brechungsexponenten man beſtimmen will, und legt dann an das Prisma Platten von geſchliffenem Spiegelglaſe, um das Loch beiderſeits zu ſchließen.

Weniger genau, aber bequemer und ſchneller findet man den Brechungsexponenten auf folgende Weiſe. Das Prisma befinde ſich in p über einem eingetheilten Stabe a b; dann wird der Theilſtrich m, welcher gerade ſenkrecht unter ihm liegt, von ſeiner Stelle verrückt erſcheinen und etwa mit einem anderen Theilſtriche q zuſammenfallen. Durch ſchickliche Drehung kann man dem Prisma leicht eine ſolche Stellung geben, für welche die Ablenkung jenes Theilſtrichs am kleinſten iſt. Wenn nun m p die Entfernung der Scala vom Prisma iſt, ſo hat man $\frac{m q}{m p}$



als Tangente des Ablenkungswinkels, für welche ſich dieſer Winkel ſelbſt auf bekannte Weiſe leicht finden läßt. Hat man auch den brechenden Winkel des Prisma's beſtimmt, ſo berechnet man den Brechungsexponenten nach der obigen Formel. Gewöhnlich beſteht dieſer Apparat aus einem höheren, rechtwinkeligen Dreiecke, welches mit einem Handgriffe verſehen iſt, um es bequem in horizontaler Richtung halten zu können. Der eine Schenkel des rechten Winkels trägt ein verticales Brettchen, auf welchem ſich die Theilung befindet, und in der Nähe des gegenüber liegenden Winkelpunktes iſt ein Loch ſo angebracht, daß ein von ihm auf das Brettchen gefälltes Perpendikel den Nullpunkt der Theilung trifft. In dieſes Loch wird das Prisma geſetzt, durch welches der Nullpunkt nach der Linken hin verſchoben erſcheint. Die Zahl des Theilſtrichs, mit dem der Nullpunkt, durch das Prisma geſehen, zuſammenfällt, und die Entfernung des Nullpunktes vom Prisma ſind nach dem Obigen die Beſtimmungsſtücke der Tangente des Ablenkungswinkels. —

Durch ſolche und andere Verſuche hat man gefunden, daß die brennbaren Körper das Licht vorzüglich ſtark brechen.

Nach der Emiſſionstheorie nimmt die Geſchwindigkeit des Lichts zu, wenn es aus einem minder brechenden Mittel in ein ſtärker brechendes übergeht. Den Zuwachs nun, welchen die Geſchwindigkeit des Lichts zufolge dieſer Theorie beim Uebergange aus dem leeren

Digitized by Google

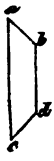
Raume in ein brechendes Mittel erhält, nannte man die brechende Kraft des Mittels, welche, wenn n den Brechungsexponenten bezeichnet, durch $n^2 - 1$ ausgedrückt wird. Dividirt man aber die brechende Kraft eines Mittels durch seine Dichtigkeit d, so bekommt man den Quotienten $\frac{n^2-1}{d}$, welcher das specifische Brechungsvermögen des Mittels heißt. Wiewohl die Emissionstheorie jetzt fast allgemein verlassen ist, so hat man dennoch diese Ausdrücke beibehalten, da sich bei einer vergleichenden Betrachtung verschiedener Stoffe hinsichtlich der Lichtbrechung ein nützlicher Gebrauch davon machen läßt.

Die folgende Tabelle enthält von einigen Körpern den Brechungsexponenten, die brechende Kraft und das specif. Brechungsvermögen.

Namen der Körper.	Dichtigkeit.	Brechungsexponent.	Brechungskraft.	Specifisches Brechungsvermögen.
Diamant	3,521	2,487	5,185	1,743
Phosphor	1,770	2,424	3,946	2,230
Spießglanzglas	4,946	2,216	3,910	0,790
Granat	4,188	1,815	2,294	0,548
Saphir	4,000	1,794	2,218	0,554
Gelber Topas	3,550	1,638	1,684	0,474
Beryll	2,650	1,598	1,554	0,586
Flintglas	3,723	1,639	1,687	0,453
Wasser	1,000	1,336	0,785	0,785
Schwefelsäure	1,841	1,440	1,074	0,538
Salpetersäure	1,480	1,406	0,977	0,660
Salzsäure	1,156	1,376	0,893	0,776
Salmiak	1,420	1,625	1,640	1,155
Schwefelkohlenstoff	1,272	1,643	1,699	1,336
Terpentinöl	0,885	1,476	1,178	1,332
Alkohol	0,825	1,374	0,885	1,076

Die vollkommensten Versuche über die Brechung des Lichts in verschiedenen Gasarten haben Biot und Arago angestellt. Sie gebrauchten hierzu ein Prisma, welches aus einer cylindrischen Röhre bestand, deren Enden nach ab und cd schräg abgeschliffen waren, in der Art, daß sie einen Winkel von 143° 7′ 28″ mit einander

Digitized by Google



bildeten. Alsdann wurden diese Enden durch Glasplatten, deren Flächen möglichst parallel waren, luftdicht geschlossen. Senkrecht auf ihre Länge hatte die Röhre eine Oeffnung, worin ein Röhrchen eingekittet war, das mit einem Hahne geschlossen und geöffnet werden konnte, um vermittelst der Luftpumpe das Prisma luftleer zu machen oder mit irgend einem Gase zu füllen. Dieser Oeffnung gegenüber war auf der anderen Seite des Prisma's eine zweite, gleichfalls mit einem Röhrchen versehene, Oeffnung angebracht, welche mit einem Barometer in Verbindung stand, um in jedem Augenblicke den Druck des im Prisma enthaltenen Gases zu erfahren.

Die Beobachtung selbst geschieht nun in der Weise, daß man das Fernrohr eines Theodoliten zuerst auf einen entfernten Punkt richtet, dann das Prisma vor das Objectivglas stellt und am getheilten Kreise den Winkel bestimmt, welchen der direct vom Punkte kommende Strahl mit dem durch das Prisma gebrochenen macht. Dieser Winkel ist sehr klein und muß durch wiederholte Messungen sehr genau bestimmt werden. Zur Berechnung des Brechungsexponenten kann man sich dann der bekannten Formel bedienen, wenn außerdem noch der brechende Winkel des Prisma's gegeben ist. Insofern die beiden Glasplatten, welche das Prisma schließen, nicht von vollkommen parallelen Flächen begrenzt sind, wird durch sie selbst schon eine Ablenkung des Strahles hervorgebracht, welche als Correction in die Rechnung einzuführen ist.

Mit diesem Apparate läßt sich nun die Brechung des Lichts sowohl für den Uebergang aus Luft in den leeren Raum als auch in verschiedenen Gasen bestimmen.

Arago und Biot haben aus ihren Versuchen das Resultat erhalten, daß die brechende Kraft der Gase ihrer Dichtigkeit proportional ist. Dieses Gesetz gilt auch für gemischte Gase oder Dünste, so daß die brechende Kraft der Mischung gleich der Summe der brechenden Kräfte der gemischten Elemente ist. Bei einem chemisch zusammengesetzten Gase findet eine solche Beziehung nicht statt. Dulong hat sehr genaue vergleichende Versuche über das Brechungsvermögen der Gase bei gleichem Drucke und gleicher Temperatur angestellt, indem er den Gasen eine solche Dichtigkeit gab, daß sie genau dieselbe Ablenkung hervorbrachten.

Die folgende Tabelle enthält einige Resultate aus diesen Versuchen.

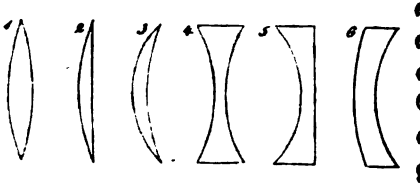
Digitized by Google

Namen der Gase.	Brechende Kraft im Vergleiche mit der Luft.	Absolute brechende Kraft.	Brechungsexponent.
Atmosphärische Luft	1,000	0,000589	1,000294
Sauerstoff	0,924	0,000544	1,000272
Wasserstoff	0,470	0,000277	1,000138
Stickstoff	1,020	0,000601	1,000300
Ammoniakgas	1,309	0,000771	1,000385
Kohlensäure	1,526	0,000899	1,000449
Chlor	2,623	0,001545	1,000772
Chlorwasserstoffsäure	1,527	0,000899	1,000449
Stickstoffoxydgas	1,710	0,001007	1,000503
Salpetergas	1,030	0,000606	1,000303
Kohlenoxydgas	1,157	0,000681	1,000340
Cyangas	2,832	0,001668	1,000834
Oelbildendes Gas	2,302	0,001356	1,000678
Sumpfgas	1,504	0,000886	1,000443
Salzsäureäther	3,720	0,002191	1,001095
Schwefeläther dampf	5,197	0,003061	1,00153

Da die Gase das Licht um so stärker brechen, je dichter sie sind, so muß jeder Lichtstrahl, welcher von einem Weltkörper schief auf unsere Atmosphäre fällt, beständig abgelenkt werden, indem er in immer dichtere Luftschichten kommt, und daher eine krumme Linie beschreiben. Hierauf beruht die astronomische Strahlenbrechung, welche im Horizonte, wo sie am größten ist, etwa einen halben Grad beträgt. Aus diesem Grunde sehen wir die Sonne schon vor ihrem eigentlichen Aufgange, und ist uns noch sichtbar, wenn sie eben untergegangen ist. Gegenstände, die sich in erhitzter oder bewegter Luft befinden, scheinen zu zittern, weil sich die Strahlenbrechung wegen der ungleichen Dichtigkeit der Luft fortwährend ändert; daher auch das Funkeln der Fixsterne.

23. Aehnlich wie in einem Prisma wird auch das Licht in einem sogenannten Linsenglase gebrochen. Unter einer Linse versteht man jedes durchsichtige Mittel, dessen Oberflächen Kugelabschnitte sind. Die folgenden Figuren zeigen 6 verschiedene Linsen im Durchschnitte. Fig. 1 ist eine auf beiden Seiten erhabene (biconvere) Linse, welche von zwei converen Kugelsegmenten begrenzt ist; Fig. 2 ist ein planconveres Glas, welches auf der einen Seite von einer Kugelfläche,

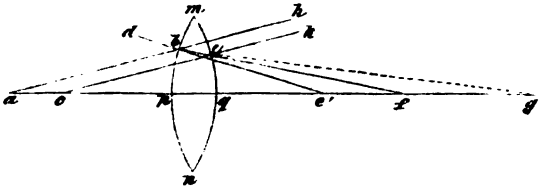
Digitized by Google



auf der anderen von einer Ebene eingeschlossen ist; 3 und 6 sind concav-convere Linsen, da eine Seite von einer concaven, die andere von einer converen Fläche gebildet wird; bei 3 ist die convere Fläche mehr gekrümmt als die concave, während bei 6 ein umgekehrtes Verhältniß stattfindet. Die Linse 4 ist beiderseits von concaven Flächen begrenzt, man nennt sie deshalb eine biconcave; 5 ist eine planconcave Linse. Verbindet man die Mittelpunkte der beiden Kugelflächen, aus denen die Linse zusammengesetzt ist, durch eine gerade Linie, so erhält man die Axe der Linse, welche zugleich durch die Mitte der letzteren gehen muß. Man verfertigt die Linsen gewöhnlich aus weißem Spiegelglase, in manchen Fällen auch aus reinen, durchsichtigen Edelsteinen, oder bildet sie aus Glasschalen, welche mit irgend einer durchsichtigen Flüssigkeit gefüllt werden.

Außer den sphärischen Linsen hat man noch elliptische, parabolische, u. s. w., welche aber ähnliche Erscheinungen wie jene zeigen.

Sei nun mn eine biconvere Linse, c und c′ deren Krümmungspunkte oder die Mittelpunkte der Kugelflächen, aus denen die Linse



besteht. Befindet sich in a ein leuchtender Punkt, so wird derjenige Strahl, welcher in der Axe cc′ selbst auf die Linse fällt, völlig ungebrochen hindurchgehen; denn die durch die Punkte p und q gedachten Tagenten sind einander parallel und der Strahl verhält sich daher gerade so, als ob er durch ein von parallelen Flächen begrenztes Mittel ginge. Fällt aber ein Lichtstrahl in irgend einer anderen Richtung auf die Linse, so wird er auf ähnliche Weise, wie in einem Prisma, gebrochen. Es treffe ein Lichtstrahl die Linse in der Richtung abh und zwar unter einem sehr kleinen Winkel mit der Axe; dann ist die von dem Krümmungsmittelpunkte c′ aus gezogene Linie c′bd das Einfallsloth, also abd der Einfallswinkel; bg sei die Richtung des Strahles nach der Brechung bei b. Der gebrochene Strahl fällt bei e auf die andere Fläche der Linse und weil derselbe hier

Digitized by Google

wieder in die Luft übergeht, so erleidet er daselbst eine zweite Brechung, welche ihm die Richtung e f ertheilen mag. Das Einfallsloth in Beziehung auf den Punkt e ist aber c e k. Da wir voraussetzen, daß der Strahl a b einen sehr kleinen Winkel mit der Axe macht, so ist der Bogen b p nur von geringer Größe, und wir können daher a b = a p und, sofern die Dicke p q der Linse unbedeutend ist, auch b g = q g = p g annehmen. Man setze a p = s, p f = α, p g = k, c e = r und c' b = ϱ. Nun ist, wenn n den Brechungsexponenten bezeichnet, $\frac{\sin abd}{\sin c'bg} = n$ oder sin a b d : sin c' b g = n : 1, und in den Dreiecken a b c' und c b g sin a c' b : sin a b c' = a b : a c',

sin c' b g : sin b c' g = c' g : b g.

Es ist aber sin a b d = sin a b c' und sin a c' b = sin b c' g.

Multiplicirt man nun die drei Proportionen mit einander und berücksichtigt die kurz zuvor angeführte Gleichheit der Sinus, so erhält man n · a b · c' g = a c' · b g oder, wenn man die obigen Buchstaben einführt, n · s · (k − ϱ) = (s + ϱ) k oder (n − 1) s k = n s ϱ + ϱ k, woraus durch Division mit s ϱ k sofort folgt

$$(n - 1)\frac{1}{\varrho} = \frac{n}{k} + \frac{1}{s}. \quad (1)$$

Ebenso läßt sich eine Gleichung für die Brechung des Strahles an der entgegengesetzten Fläche der Linse entwickeln. Da aber bei e der Strahl aus der Linse in die Luft übergeht, so hat der Brechungsexponent nunmehr den Werth $\frac{1}{n}$. Man kann indessen diese Gleichung, wie man leicht einsieht, unmittelbar aus der obigen herleiten, wenn man in ihr $\frac{1}{n}$ statt n, − r statt ϱ, − k statt s und α statt k setzt. Man bekommt dann $-\left(\frac{1}{n} - 1\right)\frac{1}{r} = \frac{1}{n\alpha} - \frac{1}{k}$ oder

$$(n - 1)\frac{1}{r} = \frac{1}{\alpha} - \frac{n}{k}. \quad (2)$$

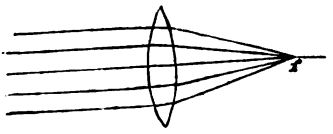
Durch Addition der Gleichungen 1. und 2. ergiebt sich aber

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{\alpha} = (n - 1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\varrho}\right). \quad (I)$$

Wenn man in dieser Formel $s = \infty$ annimmt, so hat man $\frac{1}{\alpha} = (n - 1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\varrho}\right)$, das heißt: Strahlen, die von einem unendlich entfernten Punkte kommen und daher parallel auf die Linse fallen, vereinigen sich nach der Brechung in einem Punkte f hinter

Digitized by Google

Fig. a.



der Linse. Man nennt diesen Punkt den **Brennpunkt** und seine Entfernung von der Linse die **Brennweite**. Setzt man letztere $= \varphi$, so ist

$$\frac{1}{\varphi} = (n - 1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{\varrho}\right), \quad \text{(II)}$$

wodurch die Gleichung (I) die Form

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\varphi} \text{ oder } \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\varphi} - \frac{1}{s} \quad \text{(III)}$$

erhält.

Aus dieser Formel sieht man, daß α um so größer wird, je kleiner s ist. Das heißt: je näher der leuchtende Punkt an die Linse rückt oder, was dasselbe ist, je divergirender die Strahlen auffallen, desto weniger convergiren sie nach der Brechung.

Für $s = 2\varphi$ wird auch $\alpha = 2\varphi$ oder wenn der leuchtende Punkt in der doppelten Brennweite vor der Linse steht, so vereinigen sich die von ihm ausgehenden Strahlen in derselben Entfernung hinter der Linse.

Für $s = \varphi$ wird $\alpha = \infty$, d. h. wenn sich der leuchtende Punkt im Brennpunkte befindet, so gehen die auffallenden Strahlen nach der Brechung parallel mit der Axe fort (Fig. a.). —

Bekanntlich läßt sich jede Ebene als eine Kugelfläche betrachten, deren Radius unendlich groß ist. Setzt man daher in der Formel (II) $r = \infty$, so erhält man $\frac{1}{\varphi} = (n - 1)\frac{1}{\varrho}$ für eine planconvere Linse, welche sich im Ganzen ebenso wie eine biconvere verhält. Nur hinsichtlich der Brennweite zeigt sich ein Unterschied in der Art, daß dieselbe für eine planconvere unter sonst gleichen Umständen größer ist als für eine biconvere.

Setzt man in der Formel (II) einen Radius negativ, z. B. ϱ, so bekommt man die Formel für eine concavconvere Linse, nämlich $\frac{1}{\varphi} = (n - 1)\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\varrho}\right)$. Ist $r < \varrho$ oder der Radius der converen Seite kleiner als jener der concaven, so ist $\frac{1}{r} > \frac{1}{\varrho}$ und φ erhält einen positiven Werth. Eine solche Linse muß also mit den beiden vorigen ähnliche Eigenschaften haben. Sämmtliche drei Linsen kommen darin überein, daß parallel auffallende Strahlen, eben weil der Werth der Brennweite positiv ist, durch die Brechung convergirend

Digitized by Google

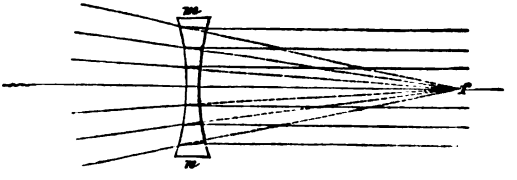
gemacht und auf der anderen Seite in einem Punkte vereinigt werden. Man nennt sie deshalb Sammellinsen, wohl auch Brenngläser, weil in ihrem Brennpunkte die Sonnenstrahlen so stark concentrirt werden, daß daselbst Körper verbrennen können. —

Sind beide Seiten einer Linse hohl, so hat man in der Formel (II) beide Halbmesser negativ zu nehmen, wodurch man erhält $\frac{1}{\varphi} = (n-1)\left(-\frac{1}{r}-\frac{1}{\varrho}\right) = -(n-1)\left(\frac{1}{r}+\frac{1}{\varrho}\right)$.

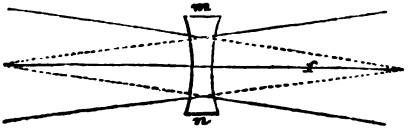
Bringt man nun in Formel (III) $-\varphi$ an die Stelle von φ, so hat man für eine biconcave Linse den Ausdruck

$$\frac{1}{\alpha} = -\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{s}. \quad \text{(IV)}$$

Weil hier die Brennweite einen negativen Werth hat, so müssen alle Strahlen, welche in paralleler Richtung auf die Linse fallen, nach der Brechung so divergiren, als ob sie von dem Punkte f herkämen. Man nennt diesen Punkt den eingebildeten Brennpunkt oder auch den Zerstreuungspunkt. Fallen hingegen die Strahlen, welche von einem leuchtenden Punkte ausgehen, divergirend auf die Linse, so wird ihre Divergenz durch die Brechung noch vermehrt. Denn so lange s, also die Entfernung des leuchtenden Punktes von der Linse, einen endlichen positiven Werth hat, ist α oder die Zerstreuungsweite negativ und kleiner als s.



Wenn die Strahlen convergirend auffallen, wo dann s negativ ist, so hat man statt der Formel (IV) $\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{s} - \frac{1}{\varphi}$. Ist $s < \varphi$, so ist α positiv, d. h. convergirend auffallende Strahlen bleiben nach ihrem Durchgange durch die Linse convergirend, aber, weil $\alpha < s$, weniger als vor der Brechung. Für $s = \varphi$ wird $\alpha = \infty$, d. h. Strahlen, welche dergestalt auf die Linse fallen, daß sie nach dem Zerstreuungspunkte f (s. obige Figur) convergiren, gehen nach der Brechung parallel mit einander fort. Sobald aber $s > \varphi$ ist, wird α negativ, d. h. wenn die Strahlen nach einem Punkte convergiren, welcher weiter von der

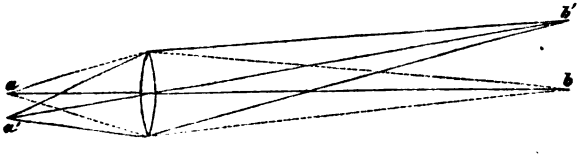


Digitized by Google

Linse liegt als der Zerstreuungspunkt f, so divergiren sie nach der Brechung so, als ob sie von einem Punkte vor dem Glase herkämen.

Wird eine von den beiden Seiten einer Hohllinse durch eine Ebene gebildet, so braucht man nur in der obigen für die Brennweite einer biconcaven Linse aufgestellten Formel einen Radius, etwa $r = \infty$ zu setzen, um die entsprechende Formel $\frac{1}{\varphi} = -(n-1)\frac{1}{\varrho}$ zu erhalten. Ist aber in derselben Formel r positiv, ϱ negativ und dabei $r > \varrho$, also $\frac{1}{r} < \frac{1}{\varrho}$, so erscheint die Formel für eine converconcave Linse, bei welcher nämlich der Radius der converen Seite größer als jener der concaven ist. Da bei diesen beiden Linsen die Brennweite negativ ist, so müssen ihre Wirkungen mit denen der biconcaven übereinkommen, so daß auch bei ihnen Lichtstrahlen, welche in paralleler Richtung auffallen, durch die Brechung zerstreut werden. Dieser Eigenschaft wegen nennt man sie Zerstreuungslinsen. —

Die bisherigen Betrachtungen gelten auch noch, wenn der leuchtende Punkt nicht auf der Hauptaxe, sondern auf einer Nebenaxe liegt, d. h. auf einer Linie, welche zwar durch den optischen Mittelpunkt, aber nicht durch die Krümmungsmittelpunkte der Linse geht. Befinde



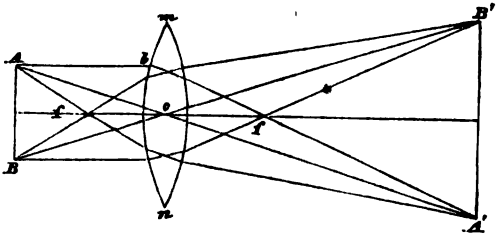
sich nun der leuchtende Punkt in a' auf einer Nebenaxe, welche mit der Hauptaxe einen kleinen Winkel macht; dann wird der in der Richtung dieser Nebenaxe auf die Linse fallende Strahl ungebrochen hindurchgehen, sofern nur die Dicke der Linse unbedeutend ist. Liegen die Punkte a und a' in gleicher Entfernung von der Linse, so werden die von a' ausgehenden Strahlen nach der Brechung in einem Punkte b' der Nebenaxe vereinigt werden, welcher eben so weit hinter der Linse liegt als der Vereinigungspunkt b der von a ausgehenden Strahlen, wovon man sich unter der Voraussetzung eines kleinen Winkels der Hauptaxe mit der Nebenaxe sehr leicht überzeugt.

Wichtig für Leuchtthürme sind die von Fresnel construirten sogenannten Zonenlinsen, welche aus mehreren linsenförmig geschliffenen Gläsern so zusammengesetzt sind, daß der Brennpunkt aller Linsen in einen einzigen Punkt fällt. In diesem Punkte befindet sich eine

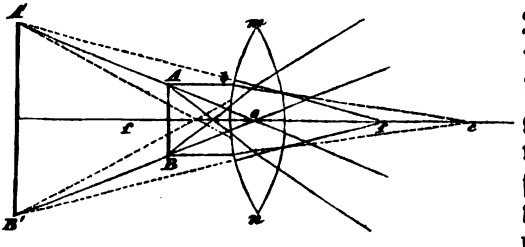
Digitized by Google

Lampenflamme, deren Strahlen, durch die Linse gebrochen, als ein beinahe paralleles Lichtbündel austreten und so weithin einen intensiven Glanz verbreiten.

24. Befindet sich auf der einen Seite einer Linse m n außerhalb ihrer Brennweite ein leuchtender Gegenstand AB, so sammeln sich die von B ausgehenden Strahlen in B′ zu einem Bilde des Punktes B; ebenso entsteht in A′ das Bild des Punktes A. Demnach ist A′B′ das Bild des Gegenstandes AB. Der Winkel AoB ist gleich dem Winkel A′oB′; vom optischen Mittelpunkte aus gesehen erscheinen also Bild und Gegenstand gleich groß und man hat AB : A′B′ = oA : oA′, so daß für oA < oA′ auch AB < A′B′ ist. Je näher der Gegenstand dem Brennpunkte f rückt, desto mehr entfernt sich auf der anderen Seite das Bild von der Linse, womit es um so größer wird. Ist aber der Gegenstand um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so müssen sich bekanntlich die von den verschiedenen Punkten des Gegenstandes ausgehenden Strahlen auf der anderen Seite der Linse wieder in derselben Entfernung sammeln, also hier ein Bild des Gegenstandes erzeugen. In diesem Falle sind Bild und Gegenstand gleich groß. Wenn der Gegenstand weiter als um die doppelte Brennweite von der Linse entfernt ist, so liegt das Bild des Gegenstandes der letzteren viel näher. Ist unter dieser Voraussetzung z. B. A′B′ der Gegenstand, so wird AB sein verkehrtes, verkleinertes Bild sein.



Befindet sich der Gegenstand innerhalb der Brennweite einer solchen Linse, so bemerkt man leicht, daß in diesem Falle kein Sammelbild entstehen kann. Ist AB der Gegenstand, so divergiren die von A und B ausgehenden Strahlen nach ihrer Brechung so, als ob sie von den Punkten A′ und B′ herkämen. Dem

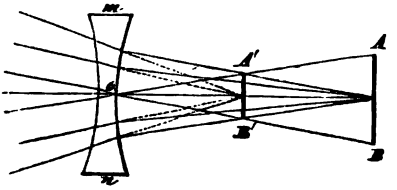


Digitized by Google

Auge, welches sich auf der anderen Seite der Linse befindet, erscheint daher A′B′ als Bild des Gegenstandes AB. Dieses Bild ist also größer und weiter von der Linse entfernt als der Gegenstand. Hierauf beruht die Wirkung der Loupe, welche zur Betrachtung kleiner Gegenstände dient. Man hat hier wieder A′B′ : AB = oA′ : oA. Es ist leicht zu übersehen, daß hier A′B′ um so größer ist, je näher AB der Linse liegt oder je kleiner die Brennweite der letzteren ist. —

Das Gesetz, nach welchem das Fortrücken des Bildes geschieht, wenn der Gegenstand um eine gegebene Größe fortrückt, läßt sich nach Möbius auf folgende Weise kurz aussprechen. Für eine Converlinse hatten wir oben die Formel $\frac{1}{s} = \frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\alpha}$, woraus man ohne Weiteres erhält $(\alpha - \varphi) = \frac{\alpha\varphi}{s}$ und $(s - \varphi) = \frac{s\varphi}{\alpha}$; werden die beiden letzteren Gleichungen mit einander multiplicirt, so bekommt man $(s - \varphi)(\alpha - \varphi) = \varphi^2$ oder $s - \varphi : \varphi = \varphi : \alpha - \varphi$, d. h. die Brennweite der Linse ist die mittlere Proportionallinie zwischen dem Abstande des Gegenstandes von dem einen und dem Abstande des Bildes von dem anderen Brennpunkte. —

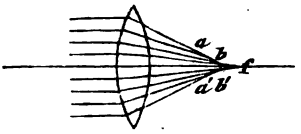
Aus dem, was wir früher über die Wirkung der Hohllinse gesagt haben, wissen wir, daß Strahlen, welche von einem Gegenstande AB auf eine solche Linse fallen, nach der Brechung so divergiren,



als ob sie von einem näher am Glase gelegenen Punkte herkämen. Eine Hohllinse kann daher kein Sammelbild geben, welches sich gleich dem leuchtenden Gegenstande verhält, sondern nur ein sogenanntes geometrisches Bild A′B′, welches aufrecht und verjüngt erscheint. Hier ist A′B′ : AB = oA′ : oA, wo oA′ < oA und daher auch stets A′B′ < AB.

25. Die in den beiden vorigen Paragraphen bestimmte Lage des Brennpunktes und des Bildes bezieht sich auf Strahlen, welche der Axe sehr nahe auffallen. Nur solche Strahlen, die man auch centrale nennt, werden in einem einzigen Punkte vereinigt. Diejenigen Strahlen aber, welche mit der Axe einen bedeutenden Winkel machen, werden stärker als jene gebrochen und müssen sich deshalb in Punkten schneiden, die der Linse näher als der Hauptbrennpunkt f liegen. Die Durchschnittspunkte a, b, a′, b′, .. bilden zu beiden Seiten der

Digitized by Google

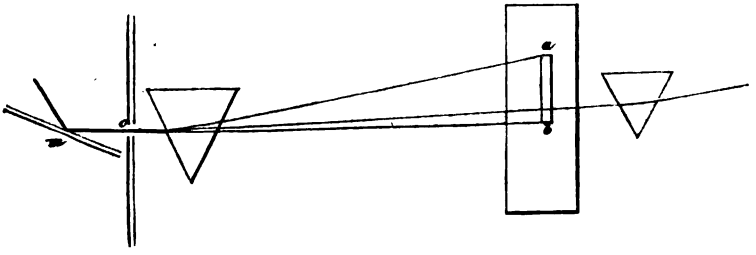


Axe eine Curve, welche man Brennlinie nennt. Es hat dies seinen Grund in der Gestalt der Linse, weshalb man es auch die Abweichung wegen der Kugelgestalt nennt. Man hat verschiedene Methoden, um diese Abweichung, wodurch die Deutlichkeit des Bildes beeinträchtigt wird, auf ein Minimum zu bringen, worauf wir aber hier nicht näher eingehen können. Die äußersten Randstrahlen pflegt man durch eine Blendung zu beseitigen.

Viertes Kapitel.

Von der Zerlegung und Zusammensetzung des Lichts.

26. Bringt man vor den Laden eines verfinsterten Zimmers einen Spiegel m, welcher ein Bündel Sonnenlicht auffängt und durch die Oeffnung o auf ein Prisma wirft, so bemerkt man auf der



gegenüberstehenden Wand statt des weißen runden Sonnenbildes, das man ohne das Prisma erhalten haben würde, einen farbigen Lichtstreifen ab. Die Breite desselben ist gleich dem Durchmesser des gewöhnlichen Sonnenbildes, seine Länge hängt aber eben sowohl von dem brechenden Winkel als auch von der brechenden Substanz des Prisma's ab. Hiervon überzeugt man sich leicht, wenn man ein hohles Glasprisma anwendet, an welchem eine Seitenfläche von einer beweglichen Glasplatte gebildet wird, wodurch sich der brechende Winkel beliebig abändern läßt. Füllt man aber dieses Prisma mit verschiedenen Flüssigkeiten, ohne den brechenden Winkel zu ändern, so zeigt sich der Einfluß der brechenden Substanz auf die Länge des Spectrums.

Aus dem obigen Versuche folgt also, daß das Sonnenlicht aus verschiedenfarbigen Strahlen zusammengesetzt ist. Wenn jener farbige

Digitized by Google

Streifen oder das sogenannte Spectrum eine hinreichende Länge hat, so unterscheidet das Auge deutlich sieben Hauptfarben, welche in der Ordnung Roth, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violet auf einander folgen. Ist aber der brechende Winkel des Prisma's nach oben gekehrt, so bemerkt man die umgekehrte Ordnung dieser Farben, dergestalt, daß sich das Violet unten, das Roth oben befindet. Auch zeigt sich, daß die verschiedenfarbigen Strahlen ungleich brechbar sind. So sind offenbar die violeten Strahlen bei a mehr von ihrer ursprünglichen Richtung abgelenkt als die rothen bei b. Ueberhaupt sind die rothen Strahlen am wenigsten brechbar, stärker werden schon die gelben, noch stärker die blauen und endlich die violeten am stärksten gebrochen. Um die ungleiche Brechbarkeit der verschiedenen Farbenstrahlen nachzuweisen, kann man auch gefärbte Gläser anwenden, welche nur eine bestimmte Farbe durchlassen. Leitet man wie im obigen Versuche vermittelst eines Spiegels einen Sonnenstrahl durch eine kleine Oeffnung in ein dunkeles Zimmer und stellt zwischen das Prisma und die Oeffnung z. B. ein blaues Glas, so geht auch durch das Prisma nur blaues Licht, welches auf einem gegenüber stehenden weißen Schirm an einem bestimmten Orte ein blaues Sonnenbildchen hervorbringen wird. Ersetzt man aber das blaue Glas durch ein rothes, so erhält man ein rothes Bildchen, welches auf dem Schirme tiefer als das blaue liegt, zum Beweise, daß die blauen Strahlen durch das Prisma stärker als die rothen gebrochen werden. Im Grunde besteht also das Spectrum aus einer Reihe verschiedenfarbiger Bilder, welche zum Theil über einander fallen. Je kleiner die Oeffnung ist, durch welche das weiße Licht auf das Prisma fällt, desto mehr treten diese verschiedenen Bilder aus einander und desto länger wird auch das Spectrum.

27. Fängt man das Sonnenspectrum (s. obige Figur) auf einem weißen, undurchsichtigen Schirme auf und macht man an irgend einer Stelle desselben, z. B. da, wo die gelben Strahlen auffallen, ein Loch, so werden diese Strahlen, wenn sie in ein dahinter gestelltes Prisma eindringen, zwar wieder gebrochen, aber hinsichtlich ihrer Farbe nicht im Mindesten verändert. Dasselbe Resultat erhält man, wenn die übrigen Farbenstrahlen diesem Versuche unterworfen werden. Die einzelnen Farben des Spectrums sind also einfach und können auf keinerlei Weise weiter zerlegt werden.

Läßt man das Farbenspectrum auf eine Sammellinse fallen, so werden alle farbigen Strahlen desselben in einem Punkte vereinigt und man erhält hier auf einem weißen Schirme oder auf einem matt

Digitized by Google

geschliffenen Glase als Bild der Sonne einen weißen, leuchtenden Fleck. Das Sonnenlicht läßt sich also auch aus den verschiedenartigen Strahlen des Spectrums wieder zusammensetzen.

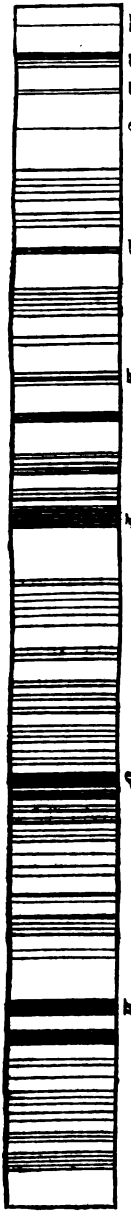
Theilt man eine Scheibe in sieben Ausschnitte und bemalt diese mit Farben, welche den prismatischen nahe kommen, so erscheint die Scheibe bei rascher Rotation weißlich; wäre es aber möglich, die Scheibe mit rein prismatischen Farben zu bemalen und zwar in dem Verhältnisse, wie sie im Sonnenspectrum vorkommen, so würde sie bei schneller Umdrehung ein vollkommenes Weiß geben. Ertheilt man nach Münchow einem Prisma vermittelst eines Uhrwerkes eine rasch oscillirende Bewegung, so geht auch das von einem Schirme aufgefangene Spectrum rasch hin und her, wodurch sich die Eindrücke aller einzelnen Farben im Auge dergestalt verwischen, daß man statt des Farbenspectrums einen Streifen sieht, welcher bis auf die Enden vollkommen weiß ist.

28. Wenn man eine oder mehrere von den Farben, aus denen das Sonnenlicht zusammengesetzt ist, beseitigt, so geht aus der Mischung der übrigen statt der weißen Farbe eine bestimmte andere hervor. Fehlt z. B. Roth, so werden die übrigen Farben zusammen eine grünliche Färbung zeigen, welche durch Zusatz von Roth wieder zu Weiß ergänzt wird. Man nennt überhaupt zwei Farben, welche einander zu Weiß ergänzen, complementäre Farben. So ist Gelb complementär zu Violet, Orange complementär zu Blau, d. h. Gelb und Violet, sowie Orange und Blau geben zusammen den Eindruck der weißen Farbe.

Das Prisma läßt sich auch zweckmäßig gebrauchen, um die natürlichen Farben der Körper zu untersuchen. Das von einem Körper ausgehende farbige Licht ist entweder einfach oder zusammengesetzt. Es ist einfach, wenn es im Prisma keine Zerlegung erfährt, zusammengesetzt, wenn es im Prisma in verschiedenfarbige Bestandtheile zerlegt wird. Das Licht einer Flamme von stark verdünntem Weingeiste, namentlich wenn sich auf dem Dochte ein Stück Kochsalz befindet, erscheint im Prisma bis auf den unteren Theil vollkommen gelb, ebenso das Licht des Schwefels, wenn er im lebhaften Verbrennen begriffen ist. In der Regel ist aber das farbige Licht zusammengesetzt. Man kann zum Behufe dieser Untersuchung eine Reihe farbiger Papierstreifchen auf ein schwarzes Papier kleben und diese aus einer bestimmten Entfernung durch ein Prisma betrachten. Wegen der ungleichen Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Strahlen sieht man die Streifen aus

Digitized by Google

ihrer Stelle verrückt; so scheint z. B. der grüne Streifen bedeutend höher zu liegen als der rothe, weil die grünen Strahlen stärker als die rothen gebrochen werden. Zugleich sind alle Farben in ihre verschiedenartigen Bestandtheile zerlegt. Der weiße Streifen zeigt ein vollkommenes Spectrum mit allen prismatischen Farben. So erscheint uns ein Körper weiß, wenn er Licht aussendet, das auf dieselbe Weise wie das Sonnenlicht zusammengesetzt ist; er erscheint schwarz, wenn es gar kein Licht oder doch so wenig Licht zurückwirft, daß er keinen merklichen Eindruck im Auge hervorbringen kann. Ein Körper ist roth, wenn er entweder nur rothes Licht oder eine Mischung von solchen Strahlen reflectirt, in der Roth vorherrscht; er ist grün, wenn er entweder einfaches Grün oder ein Gemisch von Gelb und Blau zurückwirft, welches grün erscheint; ebenso ist ein Körper violet, wenn sein reflectirtes Licht entweder aus einfachem Violet oder aus Blau und Roth besteht, u. s. w.



29. Wenn man in einem dunkelen Zimmer vor das Objectivglas eines guten Fernrohres ein Prisma mit sehr ebenen Wänden aufstellt und auf dasselbe durch eine hohe, schmale Spalte, die mit den Kanten des Prisma's parallel ist, einen Sonnenstrahl fallen läßt, so erblickt man in dem Sonnenspectrum eine Menge feiner schwarzer Linien und Streifen, welche anzudeuten scheinen, daß in dem Sonnenlichte Strahlen von gewisser Brechbarkeit fehlen. Manche dieser Linien liegen vereinzelt und sind mehr oder weniger stark und scharf begrenzt, während andere dicht bei einander stehen. Fraunhofer, von welchem dieses Phänomen entdeckt worden, hat zum Behufe leichterer Orientirung einige leicht bemerkbare Streifen ausgewählt und von dem rothen gegen das violete Ende des Spectrums hin mit den Buchstaben B, C, D, E, F, G und H bezeichnet. A, B und C sind scharf begrenzte Linien im Roth. Zwischen A und B bemerkt man noch bei a ein Bündel feiner Linien. D ist eine Doppellinie im Orange, E eine Gruppe feiner Linien im Uebergange von Gelb in Grün, F eine starke Linie im Grün, dem blauen Ende sehr nahe, G eine Gruppe feiner

Digitized by Google

Linien im Indigo; H ist ein aus vielen feinen Linien zusammengesetzter, mit einer starken Mittellinie versehener Streifen, in dessen Nähe sich ein zweiter ähnlicher befindet. Zwischen diesen ausgewählten Linien und Streifen liegt noch eine Menge feiner, scharfer Linien, deren Fraunhofer von B bis H etwa 574 zählte.

Fraunhofer fand, daß auf die Ordnung dieser Streifen weder der brechende Winkel noch die brechende Substanz des Prisma's von Bedeutung ist.

Uebrigens zeigt sich diese Erscheinung nicht allein im Sonnenlichte, sondern auch im Spectrum anderer Lichtquellen. So giebt das Licht der Venus, obgleich weniger deutlich, dieselben Linien wie das Sonnenlicht; im Lichte des Sirius bemerkt man aber Streifen, welche von denen der Sonne und Planeten ganz verschieden sind. Im Spectrum des elektrischen Lichts erblickt man statt der dunkelen Streifen helle, was auch beim Lampenlichte der Fall ist.

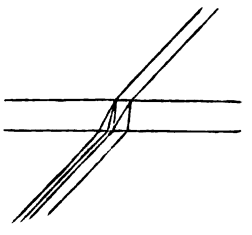
30. Da jene dunkelen Linien im Sonnenspectrum eine feste Lage haben, so ist dadurch ein Mittel gegeben, den Brechungsexponenten für die verschiedenen Strahlen des Spectrums genauer zu bestimmen. Zwar läßt sich, wenn die Richtung des einfallenden Strahles gegeben ist, aus der Lage jeder einzelnen Farbe im Spectrum auch die Richtung des gebrochenen Strahles und daher auch das Brechungsverhältniß leicht bestimmen, aber wegen der Unbestimmtheit der Grenze jeder einzelnen Farbe bleibt bei dieser Ermittelung immer einige Unsicherheit zurück. Um nun zum Behufe der praktischen Optik genaue Resultate zu erhalten, kann man, anstatt den Brechungsexponenten für die rothen, gelben, ... Strahlen zu bestimmen, den Brechungsexponenten für die den Linien B, C, D, ... entsprechenden Strahlen ermitteln. Fraunhofer hat hierüber genaue Versuche angestellt, deren Resultate zum Theil in der folgenden Tabelle enthalten sind. Die Brechungsexponenten für die Streifen B, C, D, ... sind mit n, n_1, n_2, n_3, ... bezeichnet.

Brechende Substanzen.	n	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
Flintglas Nr. 13.	1,627749	1,629681	1,635086	1,642024	1,648260	1,660285	1,671062
Crownglas Nr. 409.	1,525832	1,526849	1,529587	1,533005	1,536052	1,541637	1,546566
Crownglas Nr. 13.	1,524312	1,525299	1,527982	1,531372	1,534337	1,539908	1,544684
Crownglas lit. M.	1,554774	1,555933	1,559075	1,563150	1,566741	1,573535	1,579470
Flintglas Nr. 3.	1,602042	1,603800	1,608494	1,614532	1,620042	1,630772	1,640373
Flintglas Nr. 23.	1,626596	1,628469	1,633667	1,640495	1,646756	1,658848	1,669686
Wasser	1,330935	1,331742	1,333577	1,335851	1,337818	1,341293	1,344177
Kali.	1,399629	1,400515	1,402805	1,405632	1,408082	1,412579	1,416368
Terpentinöl	1,470496	1,471530	1,474434	1,478353	1,481736	$1,48819_8$	1,493874

Digitized by Google

Die Farbenzerstreuung ist bei verschiedenen Substanzen nicht gleich groß, wenn auch die Farben des Spectrums bei allen in derselben Ordnung auf einander folgen. Unter den Glassorten zeigen in dieser Hinsicht namentlich Crown- und Flintglas große Unterschiede. Ein Prisma von Flintglas giebt bei gleichem brechenden Winkel und in derselben Entfernung ein viel längeres Spectrum als Crownglas. Bei ersterem bemerkt man weit mehr Violet, aber viel weniger Roth als bei letzterem. Je größer der Unterschied zwischen den Brechungsexponenten der rothen und violeten Strahlen ist, desto farbenzerstreuender wirkt das Mittel, aus dem das Prisma verfertigt ist. Man nennt diesen Unterschied auch die Zerstreuung (Dispersion) des Lichts und zwar, weil Roth und Violet die äußersten Strahlen bilden, die totale Zerstreuung, während man den Unterschied der Brechungsexponenten für je zwei mittlere Farben und Streifen, wie zwischen B und C, C und D, ... die partielle Zerstreuung nennt. Sucht man das Verhältniß der Zerstreuung für zwei verschiedene Substanzen, so braucht man nur die totale oder partielle Zerstreuung der einen Substanz durch die entsprechende Zerstreuung der anderen zu dividiren.

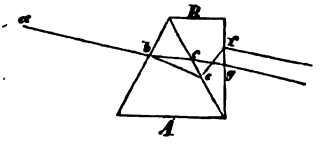
31. So lange die ungleich brechbaren Bestandtheile des Sonnenlichts zusammen in paralleler Richtung zu unserem Auge gelangen, findet keine Farbenerscheinung statt. Fällt ein weißer Lichtstrahl auf eine Glasplatte mit parallelen Oberflächen, so wird er in seine farbigen Bestandtheile zerlegt, welche aber unter einander parallel austreten. Dieselbe Zerlegung findet ein zweiter Strahl, welcher parallel mit dem ersten auffällt; auch seine farbigen Bestandtheile werden an der zweiten Fläche parallel unter einander und mit den Bestandtheilen des ersten austreten. Dies gilt von allen unter derselben Richtung auf die Platte fallenden Strahlen. Indem nun hierbei die von verschiedenen weißen Strahlen herrührenden farbigen Strahlen, aus welchen das Sonnenlicht zusammengesetzt ist, in derselben Richtung austreten, geben sie zusammen wieder Weiß. Auf dieselbe Weise behält das Sonnenlicht seine weiße Farbe unverändert bei, wenn es durch mehrere farblose Platten mit parallelen Oberflächen geht.



Durch ein Prisma werden die Bestandtheile des Lichts so gebrochen, daß sie nach ihrem Austritte aus demselben divergiren; daher das Spectrum. Soll nun bei einem Prisma die Farbenzerstreuung

Digitized by Google

wegfallen, so muß man es dahin zu bringen suchen, daß die verschiedenen Strahlen unter einander parallel austreten, ohne aber ihre Ablenkung ganz aufzuheben, wenn anders dem Prisma seine sonstige Eigenthümlichkeit verbleiben soll. Setzt man zwei Prismen so zusammen, daß ihre brechenden Winkel nach entgegengesetzten Richtungen gekehrt sind, so muß die Farbenzerstreuung des einen durch die des anderen mehr oder weniger aufgehoben werden. Ist A ein Prisma aus Crownglas, so wird durch dasselbe der einfallende Strahl a b in



seine farbigen Bestandtheile zerlegt, wovon die äußersten der rothe Strahl b c und der violete b e sind. Ist aber B ein Prisma aus Flintglas, so wird in ihm der violete Strahl stärker, der rothe schwächer als in jenem abgelenkt und zwar muß, weil die brechenden Winkel beider Prismen eine entgegengesetzte Lage haben, diese Ablenkung im entgegengesetzten Sinne der vorigen geschehen. Haben nun die brechenden Winkel der Prismen ein richtiges Verhältniß zur Farbenzerstreuung derselben, so werden die Strahlen c g und e f bei einem gewissen Einfallswinkel, aber auch nur bei diesem, in paralleler Richtung hervortreten.

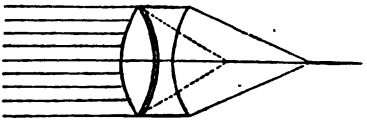
Kennt man den brechenden Winkel des einen Prisma's, so läßt sich leicht berechnen, wie groß derjenige des anderen sein muß, wenn dieses mit jenem eine gleiche Farbenzerstreuung zeigen soll. Die totale Zerstreuung des Flintglases ist 2,089 Mal größer als die des Crownglases, daher muß der brechende Winkel des Flintglasprisma's 2,089 Mal kleiner als der des Crownglasprisma's sein, um jenen Zweck zu erreichen. Ist der brechende Winkel des Prisma's aus Crownglas 30°, so ist also der des Flintglasprima's $\frac{30}{2,089} = 19°$. Werden zwei derartige Prismen auf die obige Weise mit einander verbunden, so muß die Farbenerscheinung wegfallen, da die Farbenzerstreuung des einen Prisma's der des anderen gleich und entgegengesetzt ist.

Das Brechungsvermögen ist übrigens der Farbenzerstreuung nicht geradezu proportional; so haben Crown- und Flintglas einen beinahe gleichen mittleren Brechungsexponenten, während die Farbenzerstreuung des letzteren bei Weitem größer ist als die des ersteren. Bestände zwischen dem Brechungsvermögen und der Farbenzerstreuung eine genaue Proportionalität, so würden ein Flintglas- und Crownglasprisma nur bei gleicher Ablenkung der Strahlen ein gleich langes Spectrum geben und es wäre durch die Combination beider Prismen mit der Farbenzerstreuung zugleich die Ablenkung aufgehoben.

Digitized by Google

Hat man nun nach dem Obigen ein paralleles Austreten der äußersten Strahlen bewirkt, so folgt daraus noch nicht der Parallelismus der mittleren Strahlen; es setzt dies voraus, daß die Strahlen im Spectrum des Flintglases in demselben Verhältnisse wie beim Crownglase vertheilt sind, was nicht der Fall ist. Daher kann auch die Aufhebung der Farbenzerstreuung nicht vollkommen sein.

In einer einfachen Linse werden gleichfalls die violeten Strahlen stärker gebrochen als alle übrigen, die rothen aber am wenigsten. Es werden also auch die violeten Strahlen der Linse viel näher vereinigt als die übrigen, während der Vereinigungspunkt der rothen Strahlen am weitesten davon liegt. Auf diese Weise entsteht eine Reihe farbiger Bilder hinter einander, welche die Deutlichkeit des Hauptbildes sehr beeinträchtigen. Hierher gehören die farbigen Säume, welche die Bilder solcher Linsen zeigen, namentlich wenn diese eine große Oeffnung haben. Man nennt diese Undeutlichkeit des Bildes, welche ihren Grund in der ungleichen Brechbarkeit der verschiedenfarbigen Strahlen hat, die chromatische Abweichung; sie ist meist größer als die früher erwähnte Abweichung wegen der Kugelgestalt der Linse, welche zur Folge hat, daß die Randstrahlen nicht mit den der Are sehr nahe einfallenden in einem Brennpunkte vereinigt werden. Bei einer Linse läßt sich nun die Farbenzerstreuung auf ähnliche Weise heben wie vorher beim Prisma. Setzt man eine Sammellinse aus Crownglas mit einer Hohllinse von Flintglas zusammen, so wird die Convergenz der Strahlen, welche erstere bewirkt, durch letztere kleiner, aber eben dadurch auch die Farbenzerstreuung vermindert. Hat man auf diese Weise die äußersten rothen und violeten Strahlen in einen Punkt vereinigt, so kann immer noch eine Abweichung der mittleren Strahlen übrig bleiben, wenn sich die verschiedenen Farben in beiden Körpern nicht in demselben Verhältnisse ausbreiten. Um auch diese Abweichung hinwegzuschaffen, müßte man noch eine dritte Linse anwenden. Man verbindet zu diesem Zwecke zwei Sammellinsen aus Crownglas mit einer Hohllinse aus Flintglas. Solche Linsen, bei denen die Brennpunkte der verschiedenfarbigen Strahlen in einem Brennpunkte zusammenfallen, nennt man achromatische Linsen. Eine Zusammenstellung von Linsen aber, bei der außer der chromatischen Abweichung auch die sphärische wegfällt, pflegt man aplanatisch zu nennen. Die Untersuchung über die schickliche Krümmung solcher Linsengläser



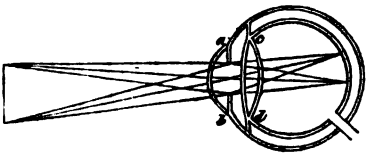
Digitized by Google

ist eine der wichtigsten, aber auch schwierigsten der praktischen Optik. Es sind dabei noch mancherlei Umstände in Erwägung zu ziehen, namentlich die ungleiche Erleuchtungskraft der verschiedenen Farbestrahlen, indem es von besonderer Wichtigkeit ist, diejenigen Strahlen in einen einzigen Punkt zu vereinigen, deren starke Erleuchtungsfähigkeit den größten Nachtheil bringt.

Fünftes Kapitel.

Vom Sehen und von den optischen Instrumenten.

32. Das Auge, dieser wundervolle Apparat, vermittelst dessen wir die äußeren Dinge wahrnehmen, besteht aus folgenden Haupttheilen. Der ganze Augapfel ist von einer harten, sehr festen Haut umschlossen, deren Vorderseite durchsichtig und sphäroidisch gekrümmt ist. Innerhalb des ganzen Umfanges dieser harten Haut liegt die Gefäß- oder Aderhaut, welche aus einem dichten Netze zarter Arterien und Venen besteht, die durch Zellgewebe zu einer Haut verbunden sind. Die innere Seite der Aderhaut ist mit einer schwarzen, schleimartigen Substanz, dem sogenannten schwarzen Pigment, überzogen, welches den Zweck hat, die durch die Seitenwände entstehenden Reflexionen des Lichts aufzuheben, wodurch sonst die Reinheit der Bilder beeinträchtigt werden würde. Hinter der Hornhaut liegt die runde und ebene Regenbogenhaut (iris) ab mit einer kreisförmigen Oeffnung, der sogenannten Pupille. Nach der Iris bemerkt man die Krystalllinse cd, die in einem zarten durchsichtigen Häutchen liegt, wodurch sie an der Hülle des Auges befestigt ist. Diese Linse ist biconver und im Allgemeinen an der hinteren Fläche stärker als an der vorderen gekrümmt. Zwischen der Hornhaut und Linse ist eine wasserhelle, etwas salzige Flüssigkeit (humor aqueus) enthalten, während sich in dem ganzen Raume hinter der Linse eine durchsichtige, gallertartige Substanz, die sogenannte Glasfeuchtigkeit (humor vitreus) befindet. Ueber der Aderhaut liegt auch die sogenannte Netzhaut (retina), welche eine Ausbreitung des Sehnerven ist.

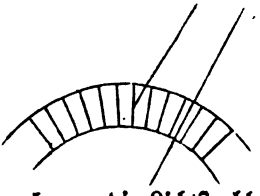


Denken wir uns nun einen leuchtenden Gegenstand, welcher sein Licht dem Auge zusendet, so müssen die durch die Hornhaut gebro-

Digitized by Google

chenen und dann durch die Pupille gehenden Strahlen in der Linse eine zweite Brechung erfahren, so daß sie auf der Netzhaut wieder vereinigt werden und daselbst ein verkehrtes Bild des Gegenstandes geben. Diejenigen Strahlen aber, welche die weiße Haut treffen, werden von dieser nach allen Richtungen zerstreut. Auch solche Strahlen, welche auf die Regenbogenhaut selbst fallen, erleiden hier eine unregelmäßige Zerstreuung, wodurch eben die Farbe dieser Haut sichtbar wird.

Die meisten Säugethiere, wie auch die Vögel, haben Augen, welche denen des Menschen ähnlich eingerichtet sind. Bei den Insekten und Crustaceen finden sich sogenannte mustvisch zusammengesetzte Augen. Auf der converen Nervenhaut, wovon die Figur einen



Durchschnitt zeigt, sind eine große Anzahl durchsichtiger Kegel senkrecht gestellt. Man bemerkt, daß nur solche Strahlen die Basis eines Kegels, also auch die Netzhaut selbst treffen können, welche in der Richtung der Axe der Kegel einfallen. Demnach können auch nur die Lichtstrahlen solcher Gegenstände, welche in dieser Richtung liegen, die Nervenhaut rühren. Die durchsichtige Hornhaut ist meist in sogenannte Facetten abgetheilt, welche jenen Kegeln entsprechen. Man sieht leicht ein, daß die Größe des Gesichtsfeldes von der Wölbung der Augen oder, was dasselbe ist, von dem Winkel abhängen muß, den die äußersten Kegel mit einander machen. — Die genauere Untersuchung der mustvisch zusammengesetzten Augen verdankt man dem Physiologen Müller.

Manche Insekten haben neben diesen zusammengesetzten Augen noch einfache linsenhaltige, wie die Wirbelthiere; andere Insekten, wie auch die Spinnen, zeigen nur die letzteren Augen.

33. Aus dem Obigen geht hervor, daß sich das Bild im Auge auf ähnliche Weise wie bei einer Sammellinse erzeugt. Ein deutliches Bild entsteht aber nur in dem Falle, daß sich die gebrochenen Strahlen gerade auf der Netzhaut vereinigen. Hiernach kann nun, insofern man die Einrichtung des Auges als unveränderlich annimmt, nur von Gegenständen, welche eine gewisse Entfernung vom Auge haben, das Bild auf die Netzhaut fallen; denn wir wissen aus dem Früheren, daß das Bild einer Linse seine Lage verändert, wenn der Gegenstand ihr genähert oder von ihr entfernt wird. Die Erfahrung zeigt aber, daß man Gegenstände in sehr verschiedenen Entfernungen deutlich sehen kann, woraus denn folgt, daß es die Fähigkeit besitzt, sich diesen

Digitized by Google

verschiedenen Entfernungen anzupassen. Freilich hat diese Fähigkeit des Auges ihre Grenzen, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man einen Gegenstand, z. B. einen Stecknadelkopf, zu nahe vor das Auge bringt. In diesem Falle ist das Auge nicht mehr im Stande, zu bewirken, daß das Bild gerade auf die Netzhaut fällt; die Strahlen vereinigen sich hinter der Netzhaut, während auf dieser selbst statt eines scharfen Bildes einzelne Zerstreuungskreise entstehen, welche keine scharfe Unterscheidung zulassen. Je näher der Gegenstand dem Auge kommt, desto weiter fällt der Vereinigungspunkt der Strahlen hinter die Netzhaut. Dies vorausgesetzt, haben Manche das deutliche Sehen in verschiedenen Entfernungen durch die Annahme zu erklären gesucht, daß sich die Länge der Augenare willkürlich vergrößern und verkleinern lasse und zwar in der Art, daß für nahe Gegenstände die Augenare länger sei als für entfernte, womit zugleich eine größere Entfernung der Netzhaut von der Hornhaut verbunden ist. Olbers hat berechnet, daß bei unveränderter Krümmung der Linse und Hornhaut eine Verlängerung der Augenare von etwa 1 Linie hinreichen würde, um das deutliche Sehen von einer Entfernung von 4 Zoll bis in's Unendliche zu erklären. Wollte man aber eine Veränderung in der Krümmung der Hornhaut zu Hilfe nehmen, so würde es zur Erklärung der Accommodationsfähigkeit des Auges genügen, wenn sich die Augenare bei einer Veränderlichkeit des Krümmungshalbmessers der Hornhaut von 0,333 bis 0,300 um ½ Linie verlängern und verkürzen könnte. Auf diese Weise läßt sich zwar jene Fähigkeit des Auges ganz gut erklären, aber es entsteht dabei die Frage, ob die Hornhaut eine so starke Veränderung ihrer Krümmung zuläßt, was eben nicht wahrscheinlich ist. Derselbe Zweck könnte auch durch eine Veränderung in der Lage und Krümmung der Linse erreicht werden, namentlich da nach Einigen die Linsenkapsel mit einem Muskelbündel versehen sein soll. Noch Andere endlich halten es für wahrscheinlich, daß in allen diesen Umständen zusammen genommen die Accommodationsfähigkeit des Auges ihren Grund habe; dann wäre nur noch zu bestimmen, bis zu welchem Grade jede dieser Ursachen ihren Beitrag giebt.

34. Bringt man dem Auge einen Gegenstand sehr nahe, so bemerkt man leicht, daß es ihm Mühe kostet, denselben deutlich zu sehen. Für jedes Auge giebt es eine gewisse Entfernung, in der es in seinem gewöhnlichen Zustande Objecte vorzüglich deutlich und klar sehen kann. Diese Entfernung beträgt für ein gesundes Auge meist 8 — 10 Zoll. Dagegen ist sie bei Kurzsichtigen bedeutend kleiner und bei Weitsichtigen viel größer als die eben angeführte. Es

Digitized by Google

hat dies wahrscheinlich seinen Grund in einem mangelhaften Accommodationsvermögen des Auges. So kann das Auge durch das öftere Lesen kleiner Schrift und durch die Gewohnheit, ihm das Papier beim Schreiben oder Lesen sehr nahe zu bringen, seine Accommodationsfähigkeit für ferne Gegenstände verlieren, wodurch es kurzsichtig wird. Bei einem kurzsichtigen Auge fallen die Bilder entfernter Gegenstände vor die Netzhaut, und da dies von einer zu starken Convergenz der Strahlen herrührt, so bedient man sich hier der Hohlgläser, welche die Strahlen weniger convergent machen und dadurch ihre Vereinigung auf der Netzhaut bewerkstelligen. Umgekehrt verhält es sich bei einem weitsichtigen Auge, in dem sich die Strahlen wegen zu geringer Convergenz hinter der Netzhaut vereinigen; hier entsprechen convexe Gläser dem Zwecke, da sie die Convergenz der Strahlen vermehren. Bei der Auswahl solcher Gläser (Brillen) ist es Regel, daß man mit den schwächsten den Versuch beginnt und sie dabei dicht vor das Auge hält. Vermittelst der Brille muß die deutliche Sehweite derjenigen eines gesunden Auges gleich kommen, nämlich 8 — 10 Zoll betragen.

Hält man ein feines Loch in einem Kartenblatte dicht vor das Auge, so sieht man durch dasselbe einen sehr nahen Gegenstand, welcher mit bloßem Auge kaum zu erkennen ist, deutlich und vergrößert. Hier kommen von einem Punkte des nahen Gegenstandes nur in einer einzigen Richtung Strahlen in's Auge, welche die Netzhaut auch nur in einem einzigen Punkte afficiren. Ohne die feine Oeffnung würde von jedem Punkte des Gegenstandes ein ganzes Strahlenbündel in's Auge dringen und auf der Netzhaut einen Zerstreuungskreis bilden, welcher ein klares Wahrnehmen unmöglich macht. Die Erfahrung lehrt aber auch, daß wir durch eine solche feine Oeffnung nahe und ferne Gegenstände gleichzeitig deutlich sehen, ohne daß das Auge nöthig hat, sich der Entfernung anzupassen. Alle von einem Punkte des nahen oder fernen Gegenstandes ausgehenden Strahlen werden hier in einem einzigen Punkte der Netzhaut so vereinigt, wie dies beim Sehen mit dem bloßen Auge dann der Fall ist, wenn sich der Gegenstand gerade in der Weite des deutlichen Sehens befindet.

Macht man in einem Kartenblatte zwei feine Nadellöcher dergestalt, daß ihre Entfernung kleiner ist als der Durchmesser der Pupille (3 — 7 Millimeter), so sieht man durch dieselben, wenn man sie dicht vor das Auge hält, einen nahe befindlichen kleinen Gegenstand, z. B. einen Stecknadelkopf, doppelt. Hier sendet der Gegenstand durch die beiden Oeffnungen zwei feine Strahlenbündel in's Auge,

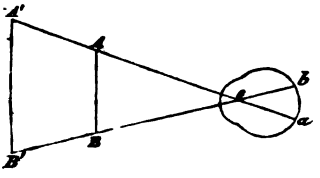
Digitized by Google

welche die Netzhaut in zwei verschiedenen Punkten afficiren. Je mehr sich aber der Gegenstand entfernt, desto näher rücken die beiden Bilder zusammen, so daß sie, wenn sich der Gegenstand in der Weite des deutlichen Sehens befindet, auf der Netzhaut zusammenfallen. Dieser Versuch ist zuerst von Scheiner angestellt worden. Es gründen sich darauf besondere Instrumente, sogenannte Brillenmesser (Optometer), welche zur Bestimmung der Sehweite dienen, aus der sich dann leicht die Brennweite der dem Auge angemessenen Brille finden läßt. So hat man ein Optometer von Young, welches aus einem feinen gespannten Faden besteht, den man durch jene kleinen Löcher betrachtet. Sieht man durch die beiden Oeffnungen nach einem etwas fernen Gegenstande, so vereinigen sich die beiden feinen Lichtbündel, welche durch die Löcher in's Auge dringen, vor der Netzhaut, und da sie von ihrem Kreuzungspunkte aus nach zwei verschiedenen Punkten der Netzhaut hin divergiren, so müssen auch zwei Bilder des Gegenstandes entstehen. Doch setzt dies voraus, daß sich der Accommodationszustand des Auges während des Versuches nicht geändert hat; findet das Auge Gelegenheit, sich der Entfernung anzupassen, so sieht man auch über die deutliche Sehweite hinaus den Gegenstand fortwährend einfach.

35. Die Einrichtung des Auges ist von der Art, daß es vollkommen von der sphärischen Abweichung frei ist. Auch sehen wir durch das Auge die Gegenstände rein und ohne jene farbigen Säume, welche man an den Rändern der Objecte wahrnimmt, wenn man sie durch eine gewöhnliche Linse betrachtet. Bekanntlich läßt sich diese Farbenerscheinung aufheben, wenn man die Linse aus Substanzen von ungleich zerstreuender Kraft zusammensetzt, wonach es sehr wahrscheinlich ist, daß auch der Achromatismus des Auges in der ungleich zerstreuenden Kraft seiner verschiedenen Feuchtigkeiten begründet ist. Doch ist der Achromatismus des Auges nur dann vollkommen, wenn es sich der Entfernung des Gegenstandes genau angepaßt hat.

36. Die scheinbare Größe der Gegenstände ist bedingt durch die Größe ihrer Bilder auf der Netzhaut. Denkt man sich von jedem Punkte des Bildes eine Linie nach den entsprechenden Punkten des Gegenstandes gezogen, so schneiden sich alle diese Linien im Innern des Auges (etwas hinter der Linse) in einem Punkte, welchen man nach Volkmann den Kreuzungspunkt nennt. Ist AB der leuchtende Gegenstand, so ist ab sein Bild auf der Netzhaut, dessen Größe von dem Winkel AcB abhängt, welchen die von den äußersten Punkten A und B ausgehenden Strahlen im Punkte c mit einander

Digitized by Google



machen. Dieser Winkel ist ein Maß für die scheinbare Größe des Gegenstandes; man nennt ihn den Sehwinkel. Man bemerkt, daß die Größe des Sehwinkels mit der absoluten Größe des Gegenstandes in directem und mit der Entfernung des letzteren vom Auge im umgekehrten Verhältnisse steht. Daher können Gegenstände von verschiedener Größe, wie AB und A'B', gleiche scheinbare Größe haben, wenn ihre absolute Größe ihren Entfernungen vom Auge proportional ist. Soll ein Gegenstand vom Auge deutlich gesehen werden, so darf der Sehwinkel nicht unter einer gewissen Grenze liegen, die sowohl von der Beschaffenheit des Auges als auch von der Beleuchtung und Farbe des Gegenstandes abhängt. Ein gewöhnliches Auge kann einen mäßig beleuchteten Gegenstand noch füglich wahrnehmen, wenn er unter einem Winkel von ½ Minute erscheint. Ist aber der Gegenstand sehr hell, wie ein glänzender Silberdraht, so kann er auf dunkelem Grunde selbst noch unter einem Winkel von 2 Secunden deutlich unterschieden werden.

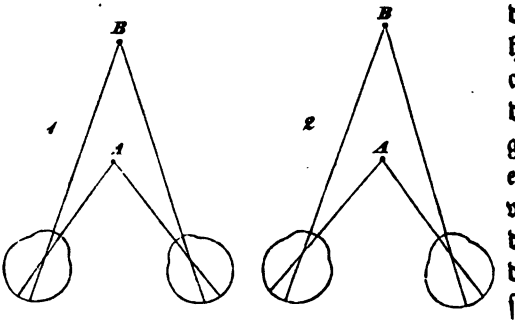
37. Wir versetzen die Wahrnehmungen des Auges in bestimmte Entfernungen nach außen, was gewiß nicht unmittelbar vom Auge, sondern nur durch die Seele geschehen kann, welche Centralpunkt aller sinnlichen Wahrnehmungen ist. Die Frage, auf welche Weise dies geschehe, — ist einerlei mit der Frage nach der Entstehung und Ausbildung des räumlichen Vorstellens überhaupt, wozu jedenfalls die unmittelbaren Empfindungen, welche durch die Affection des Sehnerven in der Seele entstehen, das Material liefern. Die Untersuchung hierüber gehört auf das Gebiet der Psychologie. Fertigkeit im Vorstellen des Räumlichen, namentlich hinsichtlich der Entfernung der Gegenstände von einander, erlangen wir durch unsere eigene Beweglichkeit im Raume, womit zugleich eine Veränderung der sinnlichen Wahrnehmungen verknüpft ist. Beim Beginne des räumlichen Vorstellens nehmen wir nur Flächen wahr, die dritte Dimension kommt erst hinzu, wenn das erste räumliche Vorstellen nach allen Richtungen hin einen hohen Grad von Ausbildung erreicht hat.

Wir sehen die Gegenstände aufrecht, obgleich die Bilder auf der Netzhaut verkehrt sind. Man hat wohl mit Recht bemerkt, daß dies großentheils von der Art und Weise herrührt, wie die Netzhaut vom Lichte afficirt wird. Die von den unteren Punkten des Gegenstandes kommenden Strahlen afficiren die Netzhaut oben, die von den oberen

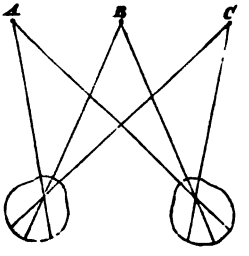
Digitized by Google

Punkten auffallenden Strahlen aber unten, die Reaction des Netzen gegen das Licht geschieht also dort von oben nach unten, hier von unten nach oben, so daß der Gegenstand aufrecht erscheinen muß.

38. Betrachten wir einen Gegenstand mit beiden Augen, so erscheint derselbe einfach, wenn sein Bild in beiden Augen auf entsprechenden Stellen der Netzhaut liegt. Sind (Fig. 1) beide Augen nach dem Gegenstande A hin gerichtet, so machen die Augenaxen die in der Figur angedeuteten Winkel mit einander und das Bild von A erscheint in jedem Auge in der Mitte der Netzhaut. Dasselbe gilt von dem Bilde des entfernteren Gegenstandes B, wenn sich beide Augen auf ihn richten, nur ist der Winkel der Augenaxen viel kleiner. Wenn beide Augen (Fig. 1) den Gegenstand A fixiren, so liegt das Bild von B im linken Auge rechts, im rechten aber links von der Mitte der Netzhaut. Hier erscheint B doppelt, weil sein Bild in beiden Augen nicht auf entsprechenden Stellen der Netzhaut liegt. Dasselbe findet (Fig. 2) bei A statt, wenn beide Augen auf B gerichtet sind. Um hierüber einen leichten Versuch anzustellen, halte man zwei Finger hinter einander, in gewissen Entfernungen, vor das Gesicht; dann sieht man den hinteren doppelt, wenn man den vorderen fixirt, umgekehrt aber den letzteren, wenn man den hinteren Finger scharf betrachtet.



Auch mehrere Gegenstände erscheinen gleichzeitig einfach und in der ihnen zukommenden Ordnung, wenn ihre Bilder in beiden Augen auf entsprechende Stellen der Netzhaut fallen. So liegt das Bild von B in jedem Auge in der Mitte der Netzhaut, das von A in beiden Augen rechts und endlich das von C in beiden links von dem Bilde des Gegenstandes B. Daher sehen beide Augen A links und C rechts von B.



Wenn die Bilder eines Gegenstandes in beiden Augen auf entsprechende Stellen der Netzhaut fallen, so verschmelzen beide

Digitized by Google

Empfindungen in eine einzige, weshalb wir den Gegenstand nur einfach sehen. Auch sieht man mit beiden Augen einen Gegenstand heller als mit einem. Betrachtet man z. B. einen Papierstreifen und hält man dabei vor das eine Auge einen Schirm so, daß für dasselbe die eine Hälfte des Streifens bedeckt wird, so erscheint der mit beiden Augen gesehene Theil merklich heller als die andere Hälfte, welche nur mit einem Auge gesehen wird. Bei Beurtheilung der Entfernung eines Gegenstandes unterstützen sich beide Augen gegenseitig, indem sich ihre Axen auf einen Punkt desselben richten. Man hänge einen Ring an einem Faden frei auf und stelle sich so, daß man seine Oeffnung nicht sieht. Nimmt man nun einen Stab, welcher an einem Ende rechtwinkelig umgebogen ist, in die Hand, so wird man mit diesem Haken die Oeffnung des Ringes in der Regel verfehlen, wenn man ihn blos mit einem Auge betrachtet, während man sie leicht treffen wird, wenn beide Augen zusammen wirken.

39. Die Wirkung des Lichts beschränkt sich nicht auf die unmittelbar getroffene Stelle der Netzhaut, sondern geht noch etwas über dieselbe hinaus. Daher erscheint uns ein heller Gegenstand auf dunkelem Grunde größer als ein gleich großer dunkeler Gegenstand auf hellem Grunde. Dieses Phänomen führt den Namen der Irradiation; es ist rein subjectiv und kann deshalb bei verschiedenen Personen von ungleicher Stärke sein. Die Größe der Irradiation wächst mit zunehmender Lichtstärke, aber in einem stets abnehmenden Verhältnisse. Auch zeigt sie sich in allen Entfernungen, während ihre absolute Ausdehnung der Entfernung des leuchtenden Gegenstandes proportional ist.

Die Irradiation oder die Ausbreitung des Lichteindrucks auf der Netzhaut ist auch die Ursache, daß die Sichel des Mondes kurz vor oder nach dem Neulichte überzugreifen scheint oder daß die Sichel einer Scheibe von größerem Halbmesser anzugehören scheint als die Scheibe, zu welcher der dunkelere Theil des Mondes gehört.

40. Jeder Lichteindruck muß eine gewisse Zeit andauern, wenn er auf die Netzhaut seine volle Wirkung ausüben soll. Geht der Eindruck zu schnell vorüber, so sieht man nichts; deshalb kann man z. B. eine Kanonenkugel in ihrem Fluge nicht wahrnehmen. Umgekehrt verschwindet der Lichteindruck, wenn er nur einigermaßen stark ist, nicht momentan, sondern erst nach einer gewissen Zeit. So erscheint eine glühende, im Kreise geschwungene Kohle als ein glühender Reif, indem der Lichteindruck von allen den Stellen, welche die Kohle nach und nach durchläuft, noch eine Zeitlang im Auge nachwirkt.

Digitized by Google

Eben daher kann man auch an einem ſchnell umlaufenden Rade die Speichen nicht unterſcheiden; wird aber das Rad, falls es im Dunklen rotirt, durch den Blitz oder einen elektriſchen Funken erleuchtet, ſo laſſen ſich die einzelnen Speichen ſehr wohl erkennen, was daher kommt, daß das Licht des Blitzes erſcheint und wieder verſchwindet, ehe noch das Rad eine merkliche Umdrehung machen kann.

Man habe eine Pappſcheibe von einigen Zollen Durchmeſſer, in der ſich diametral gegenüber zwei Löcher befinden. Zieht man durch dieſe Löcher Fäden, ſo kann man vermittelſt derſelben die Scheibe um eine in ihrer Ebene liegende Are drehen, wodurch bald die eine Seite, bald die andere der Wahrnehmung des Auges ſich darbietet. Malt man nun auf die eine Seite einen Vogel, auf die andere einen Käfig, ſo erſcheint bei raſcher Rotation der Vogel im Käfig, weil das Bild des Vogels noch auf der Netzhaut iſt, wenn der Käfig ſichtbar wird. Hierher gehören auch die Erſcheinungen der von Stampfer erfundenen ſogenannten Wunderſcheibe. Am Rande einer Pappſcheibe nämlich, welche raſch um eine horizontale Are gedreht werden kann, ſind eine Reihe viereckiger Löcher in gleichen Abſtänden angebracht; der unterhalb dieſer Löcher befindliche ringförmige Raum iſt auf einer Seite der Scheibe mit einem Gegenſtande in verſchiedenen Stellungen bemalt, ſo daß jedem Loche eine andere Stellung entſpricht. Hält man die Scheibe mit der bemalten Seite vor einen Planſpiegel und verſetzt man ſie in raſche Umdrehung, während man durch die Löcher in den Spiegel ſieht, ſo erblickt man den gezeichneten Gegenſtand in einer zuſammenhängenden Bewegung, welche je nach der verſchiedenen Stellung der Zeichnung gegen die einzelnen Löcher ſehr mannichfach ſein kann.

41. Die Nachwirkung auf der Netzhaut iſt um ſo ſtärker und anhaltender, je ſtärker und andauernder die urſprüngliche Einwirkung war. Ein ſtarker oder andauernder Lichteindruck macht aber das Auge für einen nachfolgenden derſelben Art eine Zeitlang unempfindlich. Wenn man z. B. in einem Zimmer (beſonders des Morgens nach dem Erwachen) einige Zeit ſcharf auf ein Fenſter ſieht und dann das Auge gegen eine weiße Fläche wendet, ſo erblickt man die Fenſterrahmen hell und die Zwiſchenräume dunkel. Hier ſind nämlich die von dem hellen Lichte getroffenen Stellen der Netzhaut weniger empfindlich für das weiße Licht der Wand als ſolche Stellen der Netzhaut, auf welche das Bild der dunkleren Fenſterrahmen gefallen war. Sieht man einen rothen Streifen auf einem weißen von der Sonne beleuchteten Papier eine Zeitlang ſcharf an und wendet man dann das Auge gegen eine weiße

Digitized by Google

Fläche, ſo erſcheint der Streifen grün. Hier iſt die Netzhaut für die rothe Farbe abgeſtumpft und kann alſo, gegen die weiße Fläche gerichtet, nur noch den Geſammteindruck derjenigen Farben empfinden, welche nach Wegnahme der rothen im weißen Lichte übrig bleiben; dies giebt die grüne Farbe. Das Nachbild erſcheint immer complementär zur Farbe des Streifens. Betrachtet man ſtatt des rothen einen blauen Streifen, ſo iſt das Nachbild orange, für einen gelben Streifen violet, u. ſ. w. Die auf ſolche Weiſe entſtehenden Farben nennt man *ſubjective* oder *phyſiologiſche*.

Verſchiedene Farben machen einen ungleich ſtarken Eindruck auf die Netzhaut und ſo iſt auch die Dauer der Nachwirkung für verſchiedene Farben verſchieden. Wirkt alſo gleichzeitig verſchiedenfarbiges Licht auf die Netzhaut, ſo muß im Nachbilde eine Farbe *nach* der anderen verſchwinden oder, was daſſelbe iſt, eine Farbe nach einem beſtimmten Geſetze in die andere übergehen. Hierher gehören die ſubjectiven Farben, welche man bei geſchloſſenem Auge wahrnimmt, wenn es vorher eine Zeitlang in die Sonne geſehen hat. In dieſem Falle ſieht man anfänglich noch das gewöhnliche Bild der Sonne; bald nimmt es aber vom Rande gegen die Mitte hin eine gelbe Färbung an, welche durch Orange in Roth, von Roth durch Violet in grünliches Blau übergeht, das bis zum Verſchwinden des Nachbildes immer dunkeler wird. Richtet man hingegen das durch die Sonne geblendete Auge gegen eine weiße Fläche, ſo erſcheinen die Farben in beinahe umgekehrter Ordnung, indem man zuerſt ein dunkeles Nachbild auf hellem Grunde ſieht, welches nach einander eine blaue, grüne und gelbe Färbung annimmt, bis es verſchwindet und von dem weißen Grunde nicht mehr zu unterſcheiden iſt.

Es iſt in einem hohen Grade wahrſcheinlich, daß die Intenſität der Nachwirkung bei verſchiedenen Farben nach einem verſchiedenen Geſetze abnimmt. Die weiße Farbe macht den ſtärkſten Eindruck; Gelb einen ſtärkeren als Roth, dieſes wieder einen ſtärkeren als Blau. Man hat nun der Wahrſcheinlichkeit gemäß angenommen, daß das Geſetz für die Abnahme der Intenſität dieſer Farben ſo beſchaffen iſt, daß der Eindruck des Gelben eben wegen ſeiner urſprünglichen Stärke anfangs langſam, dann ſchneller, der des Rothen aber umgekehrt zuerſt raſch und ſpäter langſam abnimmt, was noch mehr von der blauen Farbe gilt. Hierdurch erklärt ſich der oben angeführte Uebergang der Farben ganz einfach. Iſt alſo die Netzhaut durch Einwirkung eines weißen Gegenſtandes geblendet worden, ſo wird zunächſt die weiße Farbe noch etwas andauern, dann aber die

Digitized by Google

gelbe Farbe des Nachbildes hervortreten, weil die anderen Farben anfänglich rascher als Gelb an Intensität abnehmen. Nun nimmt aber bald die Nachwirkung des Gelb rasch ab, so daß die gelbe Farbe durch Orange in Roth übergeht, welches letztere wieder dem Blau Platz macht, da es eher als dieses ganz verschwindet. Wendet man dagegen das geblendete Auge, anstatt es zu schließen, gegen eine weiße Wand, so erhält man zunächst ein dunkeles Nachbild, weil die geblendeten Stellen der Netzhaut für das weiße Licht der Wand unempfänglich sind. Die Nachwirkung der blauen Farbe nimmt nun rascher ab als die der gelben und rothen, deshalb erhält die Netzhaut für die blauen Strahlen des von der Fläche kommenden weißen Lichts ihre Empfindlichkeit zuerst wieder und das Nachbild erscheint zunächst blau, dann grün und endlich gelb. Die mittleren Farben sind aber denen complementär, welche man in dem obigen Versuche bei geschlossenen Augen wahrnimmt. Hat einmal die Netzhaut für die gelben Strahlen ihre volle Empfänglichkeit wieder erlangt, so wird sie auch bald wieder für alle übrigen Farben empfindlich, so daß das gelbe Nachbild in ein weißes übergeht. — Bei der Wahrnehmung der Farben ist der Contrast derselben von besonderem Einflusse. So erscheint ein grauer Fleck auf einer weißen Fläche dunkeler, auf einer schwarzen aber heller, als wenn die ganze Fläche mit demselben grauen Farbentone überzogen wäre. Oft zeigen sich dabei complementäre Farben, welche nur subjectiv vorhanden sind. So erscheint z. B. ein grauer Papierstreifen, wenn man ihn auf ein lichtgrünes Papier legt, roth, auf einem gelben aber blau, u. s. w. Noch deutlicher treten diese Farben hervor, wenn man auf eine Tafel von farbigem Glase einen schmalen weißen Papierstreifen klebt und dann durch das Glas gegen eine weiße Fläche sieht. Alsdann erscheint der Streifen stets complementär zur Farbe des Glases, z. B. roth, wenn das letztere grün ist, u. s. w.

Läßt man einen Lichtstrahl durch ein farbiges Glas auf eine weiße Fläche fallen, so erscheint diese natürlich in der Farbe des Glases. Stellt man nun gerade zwischen dem Glase und der von ihm beleuchteten weißen Fläche einen schmalen, undurchsichtigen Körper auf, so wirft derselbe auf die Fläche einen Schatten, welcher durch das ringsum verbreitete weiße Tageslicht erhellt ist und stets complementär zur Farbe des Glases erscheint, also grün, wenn das Glas roth ist, u. s. w.

Erhält ein Körper durch zwei Lichtquellen eine doppelte Beleuchtung, so muß er zwei Schatten werfen. Wenn die beiden Lichtquellen von verschiedener Farbe sind, so wird der eine Schatten nur durch

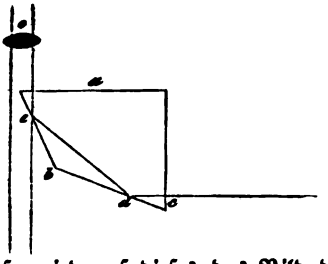
Digitized by Google

die Strahlen der einen, der andere aber nur durch die Strahlen der anderen Farbe beleuchtet werden. Auf diese Weise entstehen die blauen Schatten, welche sich während der Dämmerung in einem von einem Kerzenlichte beleuchteten Zimmer zeigen, wenn das bläuliche Himmelslicht hineinfällt. Stellt man nun einen Gegenstand so, daß er einen Schatten im Kerzenlichte, einen anderen im Tageslichte auf eine weiße Fläche wirft, so wird jener Schatten durch das blaue Tageslicht, dieser durch das gelbliche Kerzenlicht beleuchtet. Man sieht hier also einen blauen und gelben Schatten, welche wirklich objectiv verschiedenfarbig sind. Es läßt sich aber leicht zeigen, daß auch bei doppelter Beleuchtung eines Gegenstandes die beiden Schatten mit subjectiven Farben hervortreten können. Man mache in den Fensterladen eines verfinsterten Zimmers zwei Oeffnungen und stelle vor dieselben einen undurchsichtigen Gegenstand. Alsdann erhält man auf einer gegenüberstehenden weißen Tafel zwei Schatten, welche grau erscheinen, da jeder in den beleuchteten Raum des anderen fällt. Bringt man aber vor die eine Oeffnung ein rothes Glas, so sieht man den zugehörigen Schatten complementär zum Glase, nämlich grün gefärbt, während der von der anderen Oeffnung herrührende Schatten die rothe Farbe zeigt. Der dem rothen Lichte zugehörende Schatten erhält seine Beleuchtung von dem durch die unbedeckte Oeffnung eindringenden weißen Lichte, und weil an der Grenze dieses Schattens rothes Licht vorherrscht, so sieht ihn das Auge in derjenigen Farbe, welche im weißen Lichte nach Hinwegnahme der rothen Strahlen übrig bleibt. Die grüne Farbe des Schattens bemerkt man auch dann noch, wenn man ihn durch ein geschwärztes Rohr betrachtet, das alles äußere Licht abhält. Doch findet dies nur in dem Falle statt, wo vorher der Contrast mit dem rothen Lichte der Umgebung seine Wirkung geübt hat, also nicht vor Anwendung des rothen Glases. — Außer Anderen haben sich namentlich Fechner und Plateau mit den physiologischen Farben beschäftigt.

42. Wir gehen nun zur Betrachtung der optischen Instrumente über, welche theils zur Verdeutlichung naher, kleiner, theils zur Vergrößerung entfernter Gegenstände dienen, theils auch dazu, um Gegenstände naturgetreu in einer besonderen Lage darzustellen.

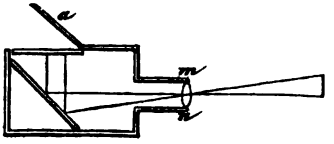
Die sogenannte Camera clara oder lucida besteht aus einem Glasprisma, welches bei b einen Winkel von 135° hat, während die beiden Flächen, von denen die eine dem Gegenstande, die andere dem Auge zugekehrt ist, unter einem rechten Winkel zusammenstoßen. Ein Lichtstrahl, welcher von einem leuchtenden Gegenstande kommt

Digitized by Google



und bei c senkrecht in das Prisma eindringt, wird bei d und e total reflectirt und gelangt so rechtwinkelig gegen die Fläche a in das Auge o. Man sieht also das Bild des Gegenstandes nach der in der Figur angedeuteten Richtung. Befindet sich unterhalb des Prisma's ein weißes Papier, so wird auf dieses das Bild des Gegenstandes projicirt, und wenn das Papier zugleich sein Licht in's Auge senden kann, so läßt sich mit einem Bleistifte leicht den Umrissen des Bildes nachfolgen. Man bemerkt, wie dieser Apparat gebraucht werden kann, um die Umrisse irgend eines Gegenstandes, wie eines Hauses, einer Landschaft u. dgl. nachzuzeichnen. Zur bequemen Handhabung ist der Apparat auf einem Gestelle angebracht. Auch läßt sich noch vortheilhaft mit diesem Apparate eine Linse verbinden, durch welche man das Bild betrachtet. — Nach Sömmering besteht die einfachste Camera clara aus einem runden Stahlspiegelchen, welches, unter einem Winkel von 45° gegen den Gegenstand geneigt, ganz nahe am Auge gehalten wird, so daß es die Pupille nur zum Theil bedeckt.

Um die Bilder entfernter Gegenstände naturgetreu und scharf darzustellen, bedient man sich am besten der sogenannten Camera obscura. Die vom leuchtenden Gegenstande kommenden Strahlen dringen durch die Linse mn in einen dunkelen Kasten, wo sie von einem Planspiegel, welcher unter einem Winkel von 45° gegen die Axe der Linse geneigt ist, nach einer matt geschliffenen Glastafel reflectirt werden, auf der sich das Bild des Gegenstandes darstellt. Durch einen Deckel a wird fremdes Licht so viel als möglich vom Bilde ausgeschlossen. Uebrigens kann man auch das vom Gegenstand kommende Licht vermittelst eines außerhalb am Kasten angebrachten Planspiegels von oben durch die Linse auf den Boden eines ziemlich hohen Kastens leiten. Der Boden ist mit einem weißen Papier bedeckt, so daß auf diesem das Bild entsteht. Durch die Wände des Kastens wird alles seitliche Licht abgehalten und daher ist hier das Bild besonders lebhaft. Man betrachtet dasselbe durch eine Seitenöffnung, welche so groß ist, daß man den oberen Theil des Körpers hindurch stecken kann. Damit die Reinheit des Bildes durch die Abweichung wegen der Farbenzerstreuung und der Gestalt der Linse so wenig als möglich



Digitized by Google

beeinträchtigt werde, wendet man nach Petzval eine Combination von zwei Crown-Flintglaslinsen an.

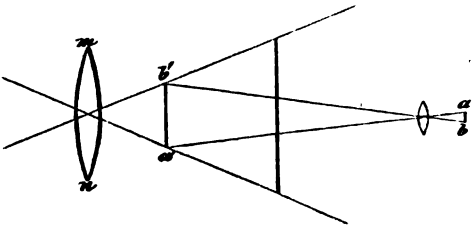
43. Bei der Betrachtung der Sammellinsen haben wir gesehen, daß jeder Gegenstand, welcher innerhalb der Brennweite einer solchen Linse steht, vergrößert erscheint und zwar um so mehr, je kleiner die Brennweite der Linse ist. Je näher ein Gegenstand dem Auge kommt, desto größer ist der Sehwinkel und desto bedeutender auch die scheinbare Größe des Gegenstandes. Wir wissen aber, daß, wenn der Gegenstand sich dem Auge näher befindet als die Entfernung des deutlichen Sehens beträgt, die Strahlen nicht mehr auf der Netzhaut vereinigt werden und daß in Folge dessen der Gegenstand undeutlich erscheint. Bringt man aber zwischen das Auge und den Gegenstand eine Linse, so divergiren die von dem Gegenstande kommenden Strahlen nach ihrem Durchgange durch die Linse so, als ob sie von einem größeren Gegenstande herkämen, der sich in der Weite des deutlichen Sehens befindet. Bei Anwendung von solchen Linsen kann man also den Gegenstand dem Auge sehr nahe bringen, dadurch den Sehwinkel bedeutend vergrößern und doch bewirken, daß die Strahlen so auf der Netzhaut vereinigt werden, als wenn sich der Gegenstand in der Weite des deutlichen Sehens befände. Man nennt nun jede Sammellinse von kurzer Brennweite ein einfaches Mikroskop, während eine Sammellinse, deren Brennweite etwas größer als die eines solchen Mikroskopes ist, Loupe genannt wird.

Entsteht das Bild a'b' gerade in der Entfernung des deutlichen Sehens, so läßt sich die Vergrößerung, welche das Mikroskop gewährt, leicht bestimmen, wenn man den Winkel, unter welchem das Bild a'b' erscheint, mit der Größe des Sehwinkels vergleicht, unter welchem der Gegenstand selbst erscheinen würde, wenn er sich in derselben Entfernung vom Auge befände. Wir setzen hier voraus, daß die Dicke der Linse unbedeutend ist, so daß man sich das nahe an die Linse gehaltene Auge im optischen Mittelpunkte o derselben denken kann. Nun haben wir $a'b' : ab = oc' : oc$, und die Vergrößerung findet nach dem Vorigen ihren Ausdruck in dem Quotienten $\frac{a'b'}{ab} = \frac{oc'}{oc}$. Im §. 23 kamen wir bei einer Converlinse auf die Gleichung $\frac{1}{s} + \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\varphi}$, wo s die Entfernung des Gegenstandes von der Linse, α die Entfernung des Bildes von der Linse und φ die Brennweite der Linse bezeichnet. Wenden

Digitized by Google

wir diese Gleichung auf unseren jetzigen Fall an, so hat man oc = s, oc′ aber gleich — α, da hier die Lage des Bildes die entgegengesetzte von der in jenem §. vorkommenden ist. Daher ist $\frac{1}{oc} - \frac{1}{oc'} = \frac{1}{\varphi}$ und $\frac{oc'}{oc} = \frac{oc'}{\varphi} + 1$ oder, wenn man die deutliche Sehweite oc′ = d setzt, $\frac{d}{\varphi} + 1$ als Werth der durch das Mikroskop hervorgebrachten Vergrößerung. Diese ist also gleich dem um die Einheit vermehrten Quotienten aus der Brennweite der Linse in die deutliche Sehweite, mithin um so bedeutender, je kleiner die Brennweite der Linse ist.

44. Das zusammengesetzte Mikroskop besteht im Allgemeinen aus zwei Sammellinsen, von denen die eine, die sogenannte Objectivlinse, dem Gegenstande zugekehrt ist, während die andere, die sogenannte Ocularlinse, als Mikroskop dient, durch welches die von der Objectivlinse erzeugten Bilder betrachtet werden. Ein Gegenstand ab, welcher vor der Objectivlinse etwas außer ihrer Brennweite steht, erzeugt hinter dieser Linse das verkehrte und vergrößerte Bild a′b′, welches, durch die Linse mn betrachtet, wie der Gegenstand eines einfachen Mikroskopes vergrößert erscheint.

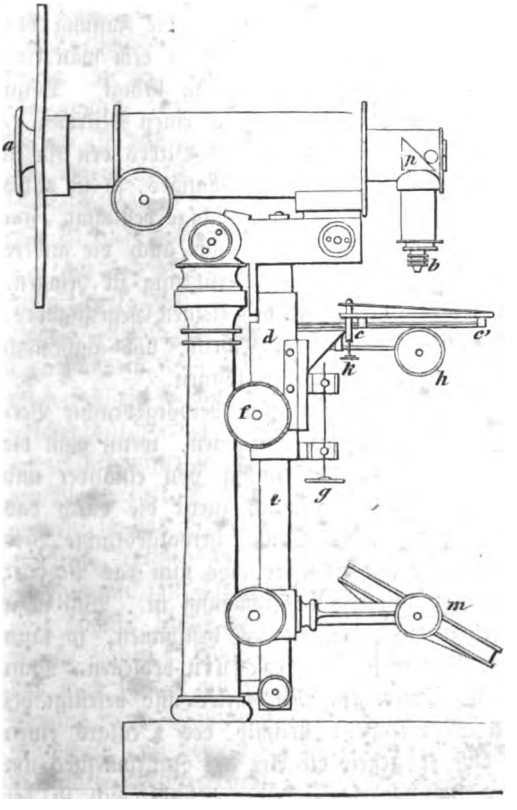


Die beiden Linsen eines zusammengesetzten Mikroskopes können nun sowohl einfach als auch zusammengesetzt sein. Um die Farbenzerstreuung bei einer einfachen Objectivlinse zu vermindern, pflegt man sie mit einer Flintglaslinse zu verbinden, so daß die letztere dem Gegenstande zugekehrt ist. Damit aber nicht allein die chromatische, sondern auch die sphärische Abweichung möglichst beseitiget werde, verbindet man zwei oder drei achromatisirte Linsen unmittelbar mit einander und bringt den Gegenstand der äußersten dieser Linsen sehr nahe. Hierbei kann man den Linsen eine ziemlich bedeutende Oeffnung geben, so daß dadurch das Bild an Helligkeit und Deutlichkeit sehr gewinnt. Die Vergrößerung einer Linse ist aber um so bedeutender, je kleiner ihre Brennweite oder ihre Oeffnung ist. Da nun bei einer kleinen Oeffnung auch weniger Licht eindringt, so muß die Helligkeit des Bildes mit zunehmender Vergrößerung abnehmen.

Als Ocular kann man eine einfache, achromatische Linse von

Digitized by Google

kurzer Brennweite anwenden, doch darf die Kürze der letzteren eine gewiſſe Grenze nicht überſchreiten, weil ſonſt eines Theils das Geſichtsfeld zu klein, anderen Theils die Helligkeit des Bildes zu gering ſein würde. Zur Hebung der Farbenzerſtreuung und ſphäriſchen Abweichung gebraucht man Oculare, welche aus zwei planconveren Linſen beſtehen, deren convere Seiten dem Gegenſtande zugekehrt ſind. Die dem Objectiv zunächſt ſtehende Linſe fängt die aus dem Objectiv tretenden Strahlen auf, ehe ſie ſich zu einem Bilde vereinigt haben, ſo daß dadurch ein von der Objectivlinſe weniger entferntes, kleineres, aber ſchärferes Bild entſteht, welches durch die andere Linſe des Oculars betrachtet wird. Bei den beſſeren Mikroſkopen dieſer Art hat man mehrere mit Nummern verſehene Oculare in Bereitſchaft, durch welche ſich eine ſtufenweiſe Vergrößerung hervorbringen läßt.



Die nebenſtehende Figur zeigt ein vorzügliches Mikroſkop von Chevalier. Die Strahlen, welche das Object ausſendet, dringen in verticaler Richtung durch das Objectiv bei b, werden dann von der Ebene eines rechtwinkeligen Prisma's p total reflectirt und gelangen ſo in horizontaler Richtung nach dem Ocular bei a. Ein durchbrochenes Tiſchchen cc' iſt an einer Hülſe d befeſtigt, welche an einem Metallſtabe e auf und abgeſchoben werden kann. Es geſchieht dies vermittelſt eines kleinen Zahnrades, das ſich am Knopfe f umdrehen läßt, während die Stellſchraube g zum feineren Einſtellen dient. Mit

Digitized by Google

Hilfe der Stellschrauben h und k aber läßt sich das Tischchen in horizontaler Richtung beliebig verschieben. Auf diese Weise kann man nicht nur das Tischchen in die gehörige Entfernung vom Objectiv, sondern auch den Gegenstand, welcher auf dem Tischchen liegt, gerade unter die Mitte der Objectivlinse bringen. Sollen durchsichtige Gegenstände beobachtet werden, so bringt man sie zwischen zwei Glasplatten und befeuchtet sie, wenn es angeht, mit einem oder einigen Tropfen reinen Wassers, so daß sie davon ganz umgeben sind, was zur Klarheit des Bildes viel beiträgt. Die gehörige Beleuchtung geschieht durch den Hohlspiegel m, welcher das Licht des Himmels oder einer Flamme nach dem Gegenstande reflectirt. Undurchsichtige Gegenstände legt man auf das Tischchen und beleuchtet sie von oben herab durch einen Hohlspiegel oder eine Sammellinse.

Vermittelst der Mikrometerschrauben h und k kann man auch die Durchmesser kleiner Gegenstände bestimmen. Ueber die Fassung des Oculars ist nämlich ein feiner Faden gespannt, mit dem man eine Seite vom Bilde des Gegenstandes in Berührung bringt. Dann verschiebt man das Tischchen durch Umdrehung der einen Mikrometerschraube so lange, bis auch die andere Seite des Bildes den Faden berührt. Kennt man die Höhe eines Schraubenganges, so ist durch die Anzahl der Umdrehungen der Schraube die Länge bestimmt, um welche das Tischchen verschoben werden mußte, um auch die andere Seite des Gegenstandes mit dem Faden in Berührung zu bringen. Diese Länge ist nun gleich dem Durchmesser des kleinen Gegenstandes. Die Köpfe der Schrauben sind ebenfalls eingetheilt, um auch noch Unterabtheilungen einer Umdrehung messen zu können.

Die durch ein zusammengesetztes Mikroskop hervorgebrachte Vergrößerung läßt sich leicht durch Rechnung bestimmen, wenn man die Brennweiten beider Linsen und ihre Entfernung von einander und vom Objecte kennt. Man bestimmt nämlich zuerst die durch das Objectiv und dann auch die durch das Ocular hervorgebrachte Vergrößerung und multiplicirt beide mit einander, wo nun das Product die durch das ganze Mikroskop bewirkte Vergrößerung ist. Will man die Vergrößerung unmittelbar durch den Versuch bestimmen, so kann man sich zweckmäßig eines Verfahrens von Jacquin bedienen. Man legt auf das Tischchen als Object ein Mikrometer und befestigt bei senkrechter Stellung des Mikroskopes oberhalb des Oculars einen kleinen Planspiegel so, daß er gegen die Axe des Instrumentes um 45° geneigt ist. Dem Planspiegel gegenüber befindet sich in der Weite des deutlichen Sehens ein in Linien getheilter Stab, dessen

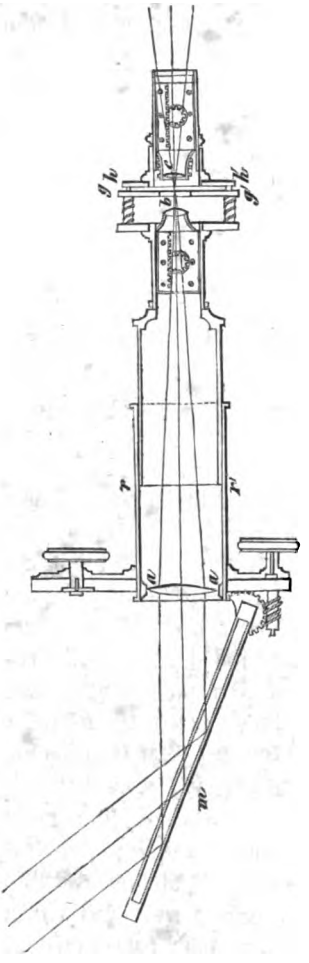
Digitized by Google

Bild mit dem vergrößerten Bilde des Mikrometers im Spiegel über einander fällt. Sieht man nun nach, wie viele Abtheilungen der Mikrometertheilung auf eine Abtheilung des Maßstabes gehen, so ergiebt sich daraus leicht die Vergrößerung des Instrumentes. Man gewahrt übrigens leicht, daß man mit demselben Objectiv und demselben Ocular eine stärkere oder schwächere Vergrößerung hervorbringen kann, je nachdem man den Gegenstand dem Brennpunkte des Objectivs mehr oder weniger nahe bringt. In diesem Falle müssen aber gleichzeitig die beiden Linsen mehr von einander entfernt oder einander genähert werden, da mit einer veränderten Stellung des Objectes auch eine Veränderung in der Lage des Bildes verbunden ist. Je näher der Gegenstand der Objectivlinse rückt, desto weiter entfernt sich das Bild von derselben und umgekehrt. —

Außer den bisher betrachteten sogenannten dioptrischen Mikroskopen, unter denen die von Plößl und Schiek verfertigten gleichfalls von ausgezeichneter Güte sind, giebt es auch noch sogenannte katoptrische oder Spiegelmikroskope, bei denen sich an der Stelle der Objectivlinse ein kleiner Hohlspiegel befindet. Das beste Spiegelmikroskop ist das von Amici erfundene. Es besteht im Wesentlichen aus einem horizontalen Rohre, in dem sich zwei Metallspiegel und ein Oculargla befinden. Der eine Metallspiegel ist elliptisch gekrümmt und an dem einen Ende des Rohres so angebracht, daß seine Axe mit der des Rohres zusammenfällt. Der andere ist ein kleiner Planspiegel, welcher unter einem Winkel von 45° gegen die Axe des Rohres geneigt ist. Seine Mitte liegt in dieser Axe und seine spiegelnde Oberfläche ist nach unten einer Oeffnung im Rohre zugekehrt, unterhalb deren sich ein Träger für den Gegenstand befindet. Der Gegenstand, welcher durch einen am Träger des Instrumentes angebrachten Hohlspiegel beleuchtet wird, wirft seine Strahlen durch die Oeffnung auf den Planspiegel, von dem sie nach dem elliptischen Hohlspiegel reflectirt werden, so daß dieser am entgegengesetzten Ende des Rohres ein Bild entwirft, welches durch das Oculargla betrachtet wird. Bei diesem Instrumente fällt die Farbenzerstreuung weg und man sieht daher die Gegenstände scharf und rein, selbst dann, wenn sie eine bedeutende Größe haben. Auch gewährt dieses Instrument noch den Vortheil, daß man schnell mit der Vergrößerung wechseln kann, ohne die Entfernung vom Planspiegel zu ändern; doch hat es auch wieder den Nachtheil, daß bei starken Vergrößerungen ein beträchtlicher Theil der Lichtstärke verloren geht. Die Spiegelmikroskope sind weit weniger als die dioptrischen Mikroskope im Gebrauche. —

Digitized by Google

Die folgende Figur zeigt ein Sonnenmikroskop. Die Strahlen der Sonne werden von einem beweglichen Spiegel m in paralleler Richtung nach einer Linse a reflectirt, welche sie durch Brechung einander nähert. Durch eine zweite Linse b wird die Convergenz der Strahlen noch vermehrt, so daß sie sich hinter der Linse in einem Punkte vereinigen, der sich in der Nähe des zu untersuchenden Gegenstandes befindet. Um den letzteren auf schickliche Weise zu befestigen, dient ein besonderer Mechanismus. Zwei viereckige Messingplatten sind durch zwei Stäbchen aus demselben Metalle mit einander verbunden. Um ein jedes dieser Stäbchen bemerkt man eine spiralförmig gewundene Feder, durch welche die Platte g g′ gegen die Platte h h′ gedrückt wird. Zwischen diese Platten lassen sich Glasplatten mit den zu untersuchenden Gegenständen einschieben. Auch kann man hier ein Gefäß mit parallelen, ebenen Glaswänden, welches Wasser mit den Gegenständen enthält, anbringen. Das ganze System läßt sich noch um die Axe der Röhre r r′ drehen, wodurch man den Gegenstand ohne Beeinträchtigung seines Bildes in verschiedene Lagen bringen kann. Der Gegenstand nun, welcher durch die beiden Linsen a und b eine starke Beleuchtung erhält, sendet seine Strahlen auf die achromatische Linse c, so daß in einer gewissen Entfernung von ihr auf einer weißen Tafel oder einem transparenten Schirm ein stark vergrößertes Bild des Gegenstandes entsteht, welches mehreren Personen zugleich sichtbar ist. Um aber die einem scharfen, hellen Bilde entsprechende Entfernung der Linse c von der Wand oder dem Papierschirme zu erhalten, ist diese Linse verschiebbar, indem an ihrer Fassung eine gezahnte Stange befestigt ist, welche in ein Getriebe eingreift. Auf dieselbe Weise ist auch die Linse b beweglich, um dem



Digitized by Google

Vereinigungspunkte der von dem Spiegel m kommenden Strahlen zum Behufe einer zweckmäßigen Beleuchtung des Objects die richtige Lage zu geben.

Die Vergrößerung, welche ein solches Mikroskop hervorbringt, läßt sich durch den Versuch und durch Rechnung bestimmen. Im ersten Falle legt man ein Glasmikrometer als Object ein und mißt die Größe seiner Abtheilungen im Bilde. Auf dem Wege der Rechnung erhält man die Vergrößerung, wenn man die Entfernung des Gegenstandes von der Linse c in die Entfernung des Bildes von derselben dividirt.

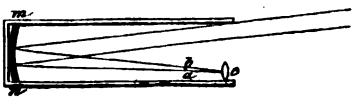
Auf demselben Princip wie das Sonnenmikroskop beruht auch das Gas- und Lampenmikroskop, nur ist bei ihnen die Beleuchtungsart etwas anders, weil die Strahlen nicht in paralleler, sondern in divergirender Richtung auf die Beleuchtungsfläche fallen. Beim Gasmikroskop geschieht die Beleuchtung des Objects durch das Licht eines frisch gebrannten Kalkstückchens in einer Knallgasflamme, beim Lampenmikroskope aber durch die Flamme einer guten Oellampe. Man läßt hier die Strahlen erst auf eine Converlinse fallen, welche sie in paralleler Richtung auf einen Plan- oder Hohlspiegel sendet, von dem sie in derselben Richtung gegen die Beleuchtungslinse reflectirt werden. —

Die Zauberlaterne, welche nicht wesentlich vom Sonnenmikroskope verschieden ist, wird bekanntlich zu mancherlei artigen Spielereien benutzt. Dieselbe besteht aus einer blechernen Laterne, welche mit einer Röhre verbunden ist, in der sich zwei Sammellinsen befinden. Vor derjenigen, welche gegen das Innere der Laterne gewendet ist, steht innerhalb ihrer Brennweite ein transparentes auf Glas gemaltes Bild, das von einer starken Flamme vermittelst eines Hohlspiegels beleuchtet wird. Die Flamme sendet nämlich ihre Strahlen auf den Hohlspiegel, von dem sie durch das transparente Bild auf die beiden Linsen geworfen werden, so daß die äußerste Linse in einer gewissen Entfernung vom Apparate ein vergrößertes Bild erzeugt, das auf einer weißen Wand aufgefangen werden kann.

45. Um entfernte Gegenstände vergrößert darzustellen, bedient man sich der Fernröhre oder sogenannten Teleskope, welche im Allgemeinen aus einem Objectiv und Ocular bestehen. Je nachdem nun das Objectiv eine Converlinse oder ein Hohlspiegel ist, nennt man das Fernrohr ein dioptrisches oder katoptrisches. Die katoptrischen Fernröhre oder Spiegelteleskope waren vorzugsweise vor Erfindung der achromatischen Linsen im Gebrauche.

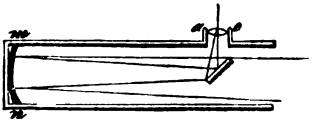
Das Herschel'sche Spiegelfernrohr ist aus einem Hohlspiegel mn,

Digitized by Google

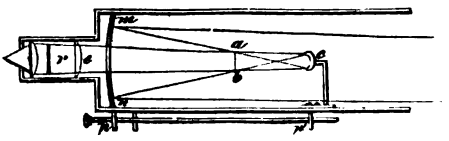


der eine geringe Neigung gegen die Are der Röhre hat, und aus einem Ocularglase c zusammengesetzt. Die vom Hohlspiegel reflectirten Strahlen erzeugen nahe am unteren Ende der Röhre ein verkehrtes Bild a b des Gegenstandes, das durch die Linse c betrachtet wird. Da hier ein Theil der Lichtstrahlen durch den Kopf des Beobachters abgehalten wird, so muß der Hohlspiegel eine ziemlich bedeutende Größe haben.

Im Newton'schen Fernrohre werden die von dem großen Hohlspiegel m n reflectirten Strahlen von einem kleinen Planspiegel, der eine Neigung von 45° gegen die Are des Rohres hat, nach der zur Seite des Instrumentes angebrachten Linse a c geworfen, durch welche man das verkehrte Bild des Gegenstandes betrachtet.



Beim Gregory'schen Fernrohre werden die Strahlen durch den Hohlspiegel m n zu einem verkehrten Bilde a b vereinigt. Dieses sendet seine Strahlen nach dem kleinen Hohlspiegel c, von dem sie durch eine kreisförmige Oeffnung des Spiegels m n reflectirt und zu einem aufrechten Bilde r vereinigt werden. Durch die Linse e wird die Convergenz der Strahlen etwas vermehrt und daher das Bild dem Spiegel etwas näher gerückt. Vermittelst der Schraube p p' kann man den Spiegel dem Ocular mehr oder weniger nähern. Bei großer Entfernung des Gegenstandes bringt man den Spiegel dem Ocular näher, bei einer geringeren Entfernung aber weiter davon.



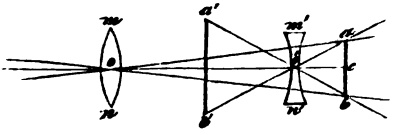
Das Cassegrain'sche Fernrohr hat an der Stelle des Hohlspiegels einen Converspiegel. Hier entsteht das Bild zwischen den beiden Linsen, indem der Converspiegel die vom großen Hohlspiegel kommenden Strahlen eher auffängt, als sie sich zu einem Bilde vereinigt haben.

46. Das Objectiv der dioptrischen Fernröhre besteht, wie wir schon bemerkt haben, aus einer Sammellinse und zwar, damit das Bild scharf und rein hervortrete, aus einer achromatischen Linse von zwei ungleich zerstreuenden Stoffen. Nach Fraunhofer wendet man ein Objectiv an, das aus einem Crown- und Flintglase besteht.

Digitized by Google

Das erstere, welches sich nach außen kehrt, ist biconvex mit ungleichen Krümmungen, das letztere convex-concav. Bei den sogenannten dialytischen Fernröhren stehen beide Linsen in einer gewissen Entfernung von einander ab und man kann deshalb der Flintglaslinse einen viel kleineren Durchmesser als dem Crownglase geben.

Bei dem holländischen oder Galiläi'schen Fernrohre fängt die Sammellinse mn die von einem entfernten Gegenstande kommenden Strahlen auf, so daß ohne die Hohllinse m'n' das Bild ab entstehen würde. Durch das Ocular m'n' aber, dessen Entfernung von ab etwas größer als seine

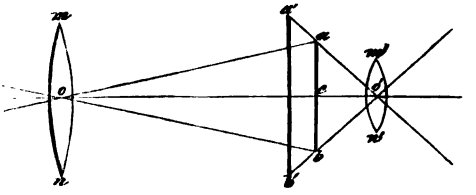


Zerstreuungsweite ist, werden die Strahlen so gebrochen, als ob sie von dem vergrößerten Bilde a'b' herkämen, welches man in der That durch das Fernrohr erblickt. Die Vergrößerung, welche dieses Instrument gewährt, läßt sich leicht berechnen. Von der Mitte des Objectivs aus sieht man das Bild ab unter dem Winkel aob, welcher zugleich derjenige ist, unter welchem der Gegenstand ohne Fernrohr erscheint. Im Fernrohre erscheint aber der Gegenstand unter dem Winkel a'o'b', wenn man sich das Auge in der Mitte des Oculars denkt, was ohne merkliche Fehler geschehen kann. Aus der Vergleichung dieser beiden Winkel ergiebt sich die Vergrößerung des Instrumentes. Wir haben nun tang $aoc = \frac{ac}{oc}$, tang $ao'c = \frac{ac}{o'c}$, daher $\frac{\text{tang } ao'c}{\text{tang } aoc} = \frac{oc}{o'c}$ und insofern die bezeichneten Winkel nur sehr klein sind, $\frac{ao'c}{aoc} = \frac{oc}{o'c}$, mithin auch $\frac{ao'b}{aob} = \frac{oc}{o'c}$. Nun ist aber oc gleich der Brennweite der Linse mn, während o'c wenig größer ist als die Zerstreuungsweite der Hohllinse m'n', so daß man ohne bedeutenden Fehler die Entfernung o'c des Bildes ab vom Ocular der Zerstreuungsweite desselben gleichsetzen kann. Die Vergrößerung des Instrumentes ist also gleich dem Quotienten aus der Zerstreuungsweite des Oculars in die Brennweite des Objectivs. Uebrigens muß für Kurzsichtige das Ocular dem Objectiv näher stehen als für Weitsichtige. Auch gewährt dieses Instrument bei starken Vergrößerungen nur ein kleines Gesichtsfeld, da die aus dem Ocular hervordringenden Strahlen divergiren. Bei den sogenannten Feldstechern von Plößl, welche im Wesentlichen mit dem Galiläi'schen Fernrohre übereinstimmen, befinden sich an einer Drehscheibe mehrere Hohlgläser von verschiedener Stärke, vermittelst deren

Digitized by Google

man schnell hinter einander verschiedene Vergrößerungen hervorbringen kann.

Das astronomische Fernrohr hat als Ocular eine Sammellinse. Die beiden Linsen haben hier eine solche Stellung zu einander, daß die von einem entfernten Gegenstande kommenden Strahlen durch



die Linse m n zu einem verkehrten Bilde a b vereinigt werden, das nun durch die Ocularlinse m'n' betrachtet in a'b' vergrößert erscheint. Den Werth der Vergrößerung kann man auf ähnliche Weise wie im vorigen Falle bestimmen. Mit bloßem Auge erscheint der Gegenstand so wie das Bild a b von der Mitte des Objectivs aus betrachtet, d. h. unter dem Winkel a o b, während er durch das Instrument so gesehen wird wie das Bild a b von der Mitte des Oculars aus, nämlich unter dem Winkel a o'b. Man hat daher $\frac{a\,o'\,b}{a\,o\,b} = \frac{o\,c}{o'c}$, wo o c die Brennweite des Objectivs und o'c die des Oculars ist. Die Vergrößerung ist demnach gleich dem Quotienten aus der Brennweite des Oculars in die des Objectivs. Die eigentliche Länge des Fernrohres ist aber, wie man sogleich einsieht, gleich der Summe der Brennweiten beider Linsen. Da es bei diesem Instrumente auf große Genauigkeit ankommt, so muß man die Farbenzerstreuung des Oculars möglichst beseitigen, welches im Ganzen auf dieselbe Weise wie beim zusammengesetzten Mikroskop geschieht, indem man das Ocular aus zwei Linsen zusammensetzt, zwischen denen das Bild des Gegenstandes entsteht. Man kann aber auch die beiden Linsen unmittelbar hinter einander stellen, so daß das Bild durch beide betrachtet wird. Bei demselben Objectiv ist die Vergrößerung um so bedeutender, je kleiner die Brennweite des Oculars ist. Da aber in diesem Falle auch die Oeffnung des letzteren kleiner werden muß, so wird dadurch das Gesichtsfeld des Fernrohres enger. Daher darf bei einem und demselben Objectiv die Vergrößerung eine gewisse Grenze nicht überschreiten. Die Helligkeit des Bildes hängt von der Oeffnung des Objectivs ab.

An der Stelle, wo sich das durch das Objectiv hervorgebrachte Bild befindet, ist ein feines Fadenkreuz ausgespannt, welches sowohl zum genauen Einvisiren als auch zur Messung der Objecte dient.

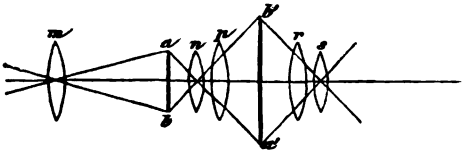
Will man die Vergrößerung eines Fernrohres unmittelbar durch den Versuch bestimmen, so betrachte man durch das Fernrohr und

Digitized by Google

gleichzeitig mit dem freien Auge einen getheilten Stab, oder auch die Ziegelreihe eines Daches, und sehe nach, wie viele mit dem bloßen Auge gesehene Theile auf einen durch das Fernrohr vergrößerten Theil des Stabes fallen. Man kann sich hierbei zweckmäßig eines Verfahrens bedienen, welches mit dem im §. 44 für zusammengesetzte Mikroskope angegebenen auf demselben Principe beruht. Man befestigt nämlich vor dem Ocular einen Planspiegel, welcher in der Mitte eine kleine Oeffnung hat, so daß er mit der Axe des Rohres einen Winkel von 45° macht. Durch die Oeffnung des Planspiegels sieht man im Fernrohre das vergrößerte Bild eines getheilten Stabes, welcher in einer passenden Entfernung vom Instrumente aufgestellt wird. Ein zweiter Planspiegel wird parallel mit dem ersten so angebracht, daß die von dem getheilten Stabe kommenden Strahlen nach dem ersten Planspiegel reflectirt werden, so daß man in diesem das gewöhnliche Bild des Stabes sieht, während man durch die Oeffnung desselben sein vergrößertes Bild wahrnimmt. Auf diese Weise läßt sich leicht die Vergrößerungszahl des Instrumentes bestimmen. —

Das astronomische Fernrohr giebt ein verkehrtes Bild des Gegenstandes.

Da dies aber bei irdischen Gegenständen in manchen Fällen unbequem ist, so construirt man ein sogenanntes Erdfernrohr, indem man mit dem Objectiv drei oder selbst vier Converlinsen verbindet, durch welche das vom Objectiv herrührende Bild nochmals umgekehrt wird. Der Gegenstand muß also aufrecht erscheinen. Das Objectivglas m vereinigt die vom Gegenstande herkommenden Strahlen zu einem verkehrten Bilde a b, von dem die Strahlen durch die Linsen n, p und die beiden übrigen gelangen, so daß man durch die beiden letzteren, nämlich durch r, s, das aufrechte, vergrößerte Bild a'b' sieht. Man wird bemerken, daß man durch eine verschiedene Entfernung der inneren Oculariinsen von einander eine verschiedene Vergrößerung hervorbringen kann, ohne die Stellung der Linse s gegen das Auge zu verändern.



Digitized by Google

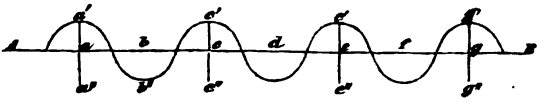
Sechstes Kapitel.

Theoretische Ansicht der Lichterscheinungen.

47. Wir wissen schon, daß sich bei der Erklärung der Lichterscheinungen zwei Hypothesen geltend gemacht haben, nämlich die Emanations- und Undulationstheorie, von denen die letztere annimmt, daß ein eigener Stoff, der Aether, sowohl den Weltraum als auch das Innere der Körper erfülle. Dieser Aether wird von den selbstleuchtenden Körpern in fortschreitende Schwingungen versetzt, welche in unserem Auge, wenn sie dahin gelangen, die Empfindung des Sehens hervorbringen. Nun läßt sich aber eine fortschreitende Wellenbewegung des Aethers, wie sie zur Erklärung der Lichterscheinungen nöthig ist, nur in dem Falle denken, daß seine Theilchen nicht nur mit dem Körper, von dem die Bewegung ausgeht, sondern auch unter einander in einem gewissen Zusammenhange stehen. Jedem Zusammenhange der Elemente unter einander liegt aber eine Anziehung zu Grunde und diese kann nur wieder da vorkommen, wo eine Ungleichartigkeit oder ein Gegensatz der Elemente stattfindet. Zwischen den Elementen des Aethers und den ihnen ungleichartigen Moleculen der Materie muß nach bekannten Grundsätzen eine Anziehung erfolgen, welche, sobald sich der Aether anhäuft, durch Repulsion beschränkt wird. Mit dem Gleichgewichte beider, nämlich der Attraction und Repulsion, ist aber, wie wir wissen, ein gewisses Maß von Elasticität verbunden. Diese Anziehung und Abstoßung kann sich bekanntlich von der Oberfläche eines größeren Körpers aus durch einen bedeutenden Raum erstrecken, in dem sich die Elasticität des Aethers, wenigstens bis zu einer gewissen Grenze, nach allen Richtungen als dieselbe betrachten läßt. Dagegen muß der im Innern eines wägbaren Körpers befindliche Aether sich so gruppiren, wie es die Anordnung der Molecule des Körpers bedingt. So wird er in unkrystallinischen Stoffen oder in solchen, welche zum regulären Systeme gehören, nach allen Richtungen gleich elastisch sein, während seine Elasticität in den übrigen krystallisirten Körpern von einer Richtung zur anderen veränderlich ist, wie sich dies aus der Gruppirung der Massentheilchen dieser Körper wahrscheinlich machen läßt.

48. Betrachten wir einen elementaren Lichtstrahl, welcher sich von der Oberfläche eines leuchtenden Körpers in der Richtung AB fortpflanzt. Die Fortpflanzung des Lichts geschieht nun dadurch, daß alle Aethertheilchen, welche für den Fall des Gleichgewichts auf der Geraden AB liegen, successiv in Schwingungen gerathen, deren

Digitized by Google



Richtung auf AB senkrecht ist. Jedes Theilchen schwingt zwischen bestimmten Grenzen hin und her; mit der Entfernung von der Gleichgewichtslage nimmt die Geschwindigkeit allmälig ab, so daß sie im Grenzpunkte selbst 0 wird; sie erlangt aber ihr Maximum, wenn das Theilchen die Gleichgewichtslage eben durchläuft. So schwingen die Theilchen des Aethers auf ähnliche Weise wie die Theile einer gespannten Saite, welche man durch einen Schlag an einem ihrer Enden in Vibration versetzt hat. Während nun das Theilchen a eine vollständige Oscillation macht, wird sich die Bewegung bis zu einem gewissen anderen Theilchen c fortgepflanzt haben, dergestalt, daß dieses Theilchen in demselben Augenblicke zu schwingen anfängt, in welchem das Theilchen a seine zweite Oscillation beginnt. Von diesem Augenblicke an befinden sich beide Aethertheilchen in gleichen Schwingungszuständen, indem sie gleichzeitig die Mitte und die Grenzpunkte ihrer Bahn erreichen. Auf eben die Weise wie von a nach c pflanzt sich die Bewegung vom letzteren weiter fort, während es eine vollständige Oscillation macht, so daß das Theilchen e in demselben Moment seine erste Schwingung beginnt, in welchem c seine zweite und a seine dritte anfängt. Die Entfernung zweier Aethertheilchen a und c nun, welche sich fortwährend in gleichen Schwingungszuständen befinden, nennt man eine Wellenlänge, eine Bezeichnung, die in demselben Sinne schon bei den Wasserwellen vorgekommen ist. Man erkennt aber, daß auch solche Aethertheilchen, welche um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge, wie z. B. a und e, a und g, aus einander liegen, sich stets in einerlei Schwingungszustande befinden. Ein Aethertheilchen b hingegen, das in der Mitte zwischen a und c liegt, das also um ½ Wellenlänge von jedem der letzteren entfernt ist, befindet sich in Beziehung auf diese in einem entgegengesetzten Schwingungszustande, nämlich wenn a und c oberhalb AB die äußersten Punkte ihrer Bahn erreicht haben, befindet sich b unterhalb AB im Grenzpunkte b″ seiner Bahn. Zwei Aethertheilchen also, welche um ½ Wellenlänge von einander entfernt sind, bewegen sich mit gleichen, aber entgegengesetzten Geschwindigkeiten. Man sieht leicht, daß dies auch für solche Theilchen der Fall ist, welche wie b und e um ³/₂ Wellenlänge oder überhaupt um ein ungerades Vielfache einer ½ Wellenlänge von einander entfernt sind.

Digitized by Google

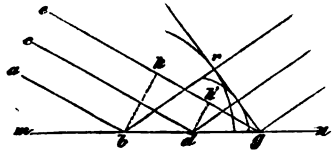
Die Figur stellt die Lage der einzelnen Aethertheilchen für einen bestimmten Augenblick der Bewegung dar.

Wir werden später sehen, daß die Wellenlänge für die verschiedenen Farbestrahlen ungleich ist; so ist sie für die rothen am größten, für die violeten am kleinsten. Dagegen sind die Schwingungen für die violeten Strahlen am schnellsten, für die rothen am langsamsten, so daß die Farbe der Strahlen von der Schwingungsdauer ihrer Aethertheilchen abhängt. Die Intensität des Lichts wird aber ohne Zweifel durch die Schwingungsweite der Aethertheilchen bedingt; sie muß um so größer sein, je weiter die Grenzpunkte der Bahn auseinander liegen. Man nimmt an, daß die Intensität des Lichts dem Quadrate der Schwingungsweite proportional sei.

Auf die obige Weise entsteht nun um die Lichtquelle eine nach allen Seiten sich ausbreitende Lichtwelle, deren Oberfläche die Gestalt einer Kugel hat, falls die Elasticität des Aethers nach allen Richtungen dieselbe ist.

49. Gelangt eine Lichtwelle an die Grenzebene zweier Mittel, in denen die Elasticität des Aethers verschieden ist, so entstehen zwei Wellensysteme, von welchen das eine in das frühere Mittel zurückkehrt, während das andere in das neue fortschreitet. Man nennt jenes Wellensystem das reflectirte, dieses das gebrochene Licht.

Die Strahlen a b, c d, e g seien Bestandtheile einer Welle, welche von einem weit entfernten leuchtenden Punkte ausgehen mag. Diese Strahlen treffen die Trennungsebene m n in den Punkten b, d, g, welche sich wie die Mittelpunkte neuer Wellen verhalten, indem die daselbst befindlichen Aethertheilchen ihre Schwingungen nach allen Seiten fortpflanzen. Sind nun die Strahlen a b, c d, e g unter einander parallel, so läßt sich die Wellenfläche b k, nämlich der geometrische Ort der gleichzeitigen Ankunft aller Vibrationen in der Lichtwelle, als eine Ebene betrachten, welche stets parallel mit sich selbst fortschreitet. Diese Wellenfläche wird aber die verschiedenen Punkte b, d, g der Trennungsebene beider Mittel zu verschiedenen Zeiten treffen, so daß sich, während sie von k nach g fortschreitet, von dem Punkte b eine sphärische Welle ausbreitet, deren Halbmesser b r gleich k g ist. Ebenso wird, während sich die Wellenebene von k' bis g fortpflanzt, von d eine sphärische Welle ausgehen, deren Halbmesser d r' gleich k' g ist. Aehnliches gilt von allen zwischen b und g liegenden Punkten, da auch

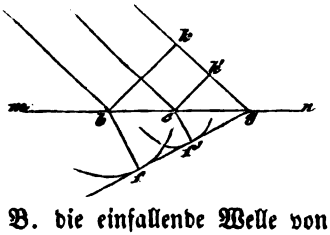


Digitized by Google

von ihnen sphärische Wellen ausgehen müssen. Eine Fläche aber, welche alle diese elementaren Kugelwellen berührt, ist die reflectirte Welle oder der geometrische Ort der gleichzeitigen Ankunft aller Vibrationen; sie schreitet wie die einfallende Wellenebene parallel mit sich selbst fort und ist gleich dieser eine Ebene. Die einzelnen Elementarstrahlen, aus denen das reflectirte Wellensystem zusammengesetzt ist, unterstützen sich gegenseitig, weil sich ihre Aethertheilchen sämmtlich in gleichen Schwingungszuständen befinden. Es geschieht dies auf eine Weise, welche wir bald werden näher kennen lernen.

In den rechtwinkligen Dreiecken bkg und brg ist kg = br, bg = bg, Winkel bkg gleich Winkel brg, daher auch der Winkel bgk gleich dem Winkel gbr. Der einfallende und reflectirte Strahl machen also mit der spiegelnden Ebene gleiche Winkel und es ist deshalb auch, wenn man sich in b das Einfallsloth denkt, der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel.

Jene sphärischen Wellensysteme, welche sich von den verschiedenen Punkten der Trennungsebene ausbreiten, müssen natürlich auch in das andere Mittel übergehen. Wenn aber die Elasticität des Aethers in beiden Mitteln verschieden ist, so können sich die Lichtwellen nicht in beiden mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen. Schreitet die Wellenbewegung im zweiten Mittel langsamer fort als im ersten, so wird, während sich die einfallende Wellenebene von k bis g fortpflanzt, von b eine sphärische Welle ausgehen, deren Halbmesser bf kleiner als kg ist. Dasselbe gilt von den übrigen Elementarwellen, welche sich im zweiten Mittel fortpflanzen. Während z. B. die einfallende Welle von k' bis g fortgeht, breitet sich gleichzeitig von c eine sphärische Welle aus, deren Halbmesser cf' kleiner als k'g ist und zwar in demselben Verhältnisse, in welchem bf kleiner als kg, so daß man hat bf : cf' = kg : k'g. Denkt man sich nun vom Punkte g an die in der Figur angedeuteten Bögen eine Tangente gezogen und durch diese, senkrecht gegen die Halbmesser bf und cf', eine Ebene gelegt, so hat man die Berührungsebene sämmtlicher sphärischer Elementarwellen. Diese Berührungsebene stellt die gebrochene ebene Welle dar, welche sich in dem neuen Mittel parallel mit sich selbst fortbewegt. Nun ist in den rechtwinkeligen Dreiecken bfg und bkg die Linie kg der Sinus des Winkels gbk und bf der Sinus des Winkels bgf; die Linien kg und bf verhalten sich aber



Digitized by Google

wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der Lichtwellen in beiden Mitteln, und da dieses Verhältniß ein unveränderliches ist, so ist es auch das jener Sinus. Denkt man sich bei b das Einfallsloth gezogen, so ist der Winkel kbg, welchen die einfallende Wellenebene bk mit der brechenden Ebene mn macht, gleich dem Einfallswinkel, und der Winkel bgf, welchen die gebrochene Wellenebene fg mit der brechenden Ebene bildet, gleich dem Brechungswinkel. Demnach haben wir hier das bekannte Brechungsgesetz, nach welchem der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem unveränderlichen Verhältnisse steht. Der Brechungsexponent ist somit nichts Anderes als das Verhältniß der Geschwindigkeiten, mit welchen sich die Lichtwellen in verschiedenen Mitteln fortpflanzen. Ist der Brechungsexponent $n > 1$, so pflanzt das brechende Mittel die Wellenbewegung langsamer fort als das anfängliche Mittel, das Gegentheil erfolgt, wenn $n < 1$.

Nach analytischen Betrachtungen von Cauchy hängt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Aetherschwingungen, welche einen gewissen Farbestrahl bilden, von der Schwingungsdauer derselben ab, auf eine Weise, welche durch die Natur des Mittels bestimmt wird. So werden diejenigen Lichtstrahlen, in welchen die Schwingungen des Aethers in kürzerer Zeit vollendet werden, im brechenden Mittel langsamer fortgepflanzt als solche, in denen die Schwingungsdauer größer ist. Nun wird aber der Brechungswinkel bei gleichem Einfallswinkel von dem Verhältnisse der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der verschiedenen Strahlen im brechenden Mittel bedingt, dergestalt, daß die Brechung für eine Lichtwelle um so stärker ist, je langsamer sie sich in dem brechenden Mittel fortpflanzt. Deshalb werden auch diejenigen Wellen, welche das violete Licht bilden, stärker gebrochen als die rothen Strahlen, bei denen die Schwingungsdauer und die Wellenlänge größer ist. Hierauf beruht nach der Undulationstheorie die Zerlegung des weißen oder überhaupt des zusammengesetzten Lichtes in seine einzelnen farbigen Bestandtheile.

50. Man wird bemerkt haben, daß nach der Vibrationstheorie die Erklärung der Reflexion und Brechung des Lichts aus derselben Quelle fließt, nämlich aus der Erschütterung der Aethertheilchen in der Grenzebene beider Mittel. An der Grenze eines durchsichtigen Körpers müssen daher stets beide Erscheinungen zugleich auftreten. Schon Huyghens hat auf obige Weise die Erklärung der Reflexion und Brechung des Lichts gegeben.

Die Emanationstheorie erklärt die Spiegelung des Lichts durch

Digitized by Google

eine Kraft, welche auf die Lichttheilchen abstoßend wirkt, und zwar soll die Wirksamkeit dieser Kraft schon beginnen, ehe noch die Lichttheilchen die reflectirende Ebene ganz erreicht haben. Man denkt sich nämlich die Geschwindigkeit des schief einfallenden Lichtstrahles in eine mit der spiegelnden Ebene parallele und in eine auf ihr senkrechte zerlegt. Während nun die erstere von der abstoßenden Kraft keine Einwirkung erfährt, wird die letztere durch dieselbe allmälig geschwächt, in der Art, daß der Strahl eine krumme, gegen das Mittel convexe Bahn beschreiben muß. Endlich wird die senkrechte Geschwindigkeit des Strahles ganz aufgehoben, indem durch die abstoßende Kraft eine ihr entgegengesetzte erzeugt wird, welche, mit der unversehrt gebliebenen parallelen Geschwindigkeit zusammengesetzt, eine der vorigen ganz ähnliche Curve ergiebt, so daß das Licht an dem Punkte, wo es aus dem Bereiche der abstoßenden Kraft heraustritt, nach der Tangente dieser Curve fortgeht und so den reflectirten Strahl bildet. Um aber die Brechung des Lichts nach dieser Theorie zu erklären, kann man nicht umhin, dem brechenden Mittel auch eine anziehende Kraft gegen das Licht beizulegen. Das Weitere der Brechung ergiebt sich leicht, wenn man sich die Geschwindigkeit des eindringenden Strahles wieder in eine zur brechenden Ebene senkrechte und in eine mit ihr parallele zerlegt denkt. Man bemerkt, daß nach dieser Erklärungsweise nicht jener enge Zusammenhang zwischen der Reflexion und Brechung des Lichts stattfindet wie bei der Vibrationstheorie, abgesehen noch davon, daß beide Erscheinungen durch einander entgegengesetzte Annahmen erklärt werden, welche eigentlich widersprechend, jedenfalls ganz willkürlich sind. Indessen läßt sich der Emanationstheorie mit Hilfe unserer früher dargelegten Principien eine Erklärung abgewinnen, welche sowohl die Reflexion als auch die Brechung des Lichts umfaßt. Man nehme der Emissionstheorie gemäß an, der Lichtäther werde unmittelbar von der Oberfläche des leuchtenden Körpers ausgesendet und treffe auf seinem Wege die Grenze eines durchsichtigen Mediums. Sobald sich nun der Aether um die Molecule der Grenzebene anhäuft, gerathen seine Elemente in Repulsion wider sich selbst, wodurch dann nothwendig vermöge allseitiger Ausstrahlung eine Theilung des Aethers in reflectirten und durchgelassenen entstehen muß. Jedes Molecul der Grenzebene des brechenden Mittels ist ein Mittelpunkt für die Repulsion der Aetherelemente unter einander. Je rauher die Fläche des Mittels ist, desto mehr erfolgt aus der Repulsion eine Zerstreuung des Aethers nach allen Richtungen; je feiner aber die Politur der spiegelnden Oberfläche ist, desto regelmäßiger geschieht die Reflexion,

Digitized by Google

und es ist möglich, daß bei wohl geebneten Flächen der darauf fallende Aether die noch vorhandenen feinen Unebenheiten ausfüllt und dadurch die Reflexion noch regelmäßiger macht. Diejenigen Aetherelemente aber, welche in das neue Mittel eindringen, erfahren wegen der zwischen ihnen und den Moleculen der Materie bestehenden Anziehung eine Ablenkung von ihrer früheren Richtung.

Auf diese Weise etwa ließen sich die erwähnten Erscheinungen erklären, ohne eine andere Kraft in Anspruch zu nehmen als die Anziehung der Aethertheilchen zu den Moleculen der Materie, eine Annahme, deren sich auch die Vibrationstheorie nicht wohl entschlagen kann. Doch giebt es andere Erscheinungen des Lichts, welche nur die Vibrationstheorie mit Präcision zu erklären vermag. Zu diesen wollen wir jetzt übergehen.

Siebentes Kapitel.

Von den Beugungs- und Interferenzerscheinungen des Lichts.

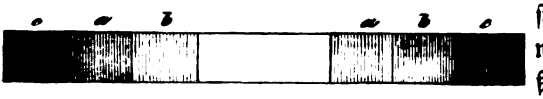
51. Läßt man Sonnenlicht durch eine feine Oeffnung am Fensterladen eines verfinsterten Zimmers auf einen schmalen Körper fallen, so bemerkt man, daß der Schatten des letzteren breiter ist, als er unter Voraussetzung geradliniger Fortpflanzung des Lichts sein sollte. In der Mitte des Schattenbildes, wo man die größte Dunkelheit erwartet, sieht man einen hellen Streifen, zu beiden Seiten desselben dunkele Linien und weiter hin auch einige farbige Säume. Fängt man die durch die Oeffnung eindringenden Strahlen, anstatt sie auf einen schmalen Körper fallen zu lassen, auf einem weißen Schirm auf, so gewahrt man einen erleuchteten Raum, welcher größer ist, als er bei geradlinigem Fortgange des Lichts durch die Oeffnung sein kann. Am Umfange des erleuchteten Raumes bemerkt man gleichfalls farbige Säume. Es scheint also, als ob diesen Erscheinungen, welche zuerst von Grimaldi beobachtet wurden, eine Ablenkung des Lichts vom geraden Wege zu Grunde liege, wenn es an den Rändern undurchsichtiger Körper vorbeigeht. Man nennt diese Ablenkung auch **Beugung** (Inflexion) des Lichts.

52. Man lasse das durch eine feine Oeffnung des Fensterladens dringende Licht durch eine zweite Oeffnung gehen, welche mit der ersten in derselben Richtung liegt, und fange es auf einem weißen Schirme auf. Man sieht dann, wenn die Oeffnung rund ist, einen

Digitized by Google

weißen runden Fleck, welcher von mehreren Ringen umgeben ist, die viel breiter erscheinen, als es bei einem geradlinigen Fortgange der Strahlen möglich wäre. Bei einer schmalen Spalte sieht man abwechselnd helle und dunkele Streifen, welche mit der Spalte parallel sind.

Fraunhofer wandte zur Beobachtung dieser Erscheinungen zweckmäßig ein Fernrohr an, das er auf die Spalte im Fensterladen richtete und vor dessen Objectiv er die zweite Spalte befestigte. Sieht man durch das Ocular des Fernrohres nach der Lichtquelle hin, so erblickt man eine schöne Farbenerscheinung. In der Mitte des Gesichtsfeldes sieht man



nämlich einen weißen Streifen, welcher gegen seine beiden Enden zu gelb und roth gefärbt ist. Seine Höhe ist gleich der scheinbaren Höhe der Lichtlinie, während seine Breite um so bedeutender, je schmäler die Spalte vor dem Objectiv ist. Zu beiden Seiten dieses Streifens gewahrt man eine Reihe von Farbenbildern a, b, c, welche allmälig in einander übergehen und immer lichtschwächer werden. Das Farbenbild a ist am lebhaftesten und enthält fast alle prismatischen Farben dergestalt, daß die violete Farbe sich an dem Ende befindet, welches dem weißen Streifen zugekehrt ist, die rothe aber am entgegengesetzten Ende. Bei den folgenden Bildern sind die prismatischen Farben nicht vollständig vorhanden; so fehlt beim zweiten Violet, beim dritten Blau und Violet, u. s. w. Diese einzelnen Farbenbilder sind um so breiter, je schmäler die Spalte vor dem Objectiv des Fernrohres ist. Die Ablenkung des Lichtes steht hiernach mit der Breite der Spalte im umgekehrten Verhältnisse. Je breiter die Spalte im Fensterladen ist, durch welche das Licht eingelassen wird, desto undeutlicher werden die einzelnen Farbenbilder, so daß sie bei einer gewissen Größe der Spalte sämmtlich verschwinden, da mehrere derselben über einander fallen.

Will man diese Beugungserscheinung vermittelst des Fernrohres für homogenes Licht erhalten, so braucht man nur vor der Spalte im Fensterladen ein Glas anzubringen, welches nur gleichartiges Licht, z. B. rothes, durchläßt. Man kann aber auch unmittelbar vermittelst des Glases durch die Spalte nach der Lichtlinie hinsehen. Man bemerkt dann in der Mitte einen hellen Streifen, zu dessen beiden Seiten sich andere befinden, welche allmälig an Helligkeit abnehmen. Sämmtliche Streifen sind durch dunkele Zwischenräume von einander getrennt. Wendet man auf dieselbe Weise verschieden gefärbte Gläser an, so sieht man im Ganzen dieselbe Erscheinung, jedoch von ver-

Digitized by Google

schiedener Ausdehnung. Für rothes Licht sind die Streifen am breitesten und stehen am weitesten von einander ab; für die übrigen Farben werden sie allmälig schmäler, indem sie gleichzeitig einander näher rücken, so daß die ganze Erscheinung für violetes Licht die geringste Ausdehnung hat.

Bringt man vor das Objectiv des Fernrohres einen Schirm mit zwei gleichen nahe neben einander stehenden Spalten, so werden die im Vorigen erwähnten Streifen in mehrere kleinere abgetheilt, obschon die ganze Erscheinung mit derjenigen Aehnlichkeit hat, welche man bei einer einzigen Spalte erhält. Nach Fraunhofer nennt man die obigen Streifen, welche bei einer Spalte entstehen, Spectra erster Ordnung, die durch zwei Spalten entstandenen kleineren aber Spectra der zweiten Ordnung. Wird zu den beiden vorigen Spalten noch eine dritte hinzugefügt, so wird die Anzahl der Streifen, welche die Spectra der ersten Ordnung durchschneiden, noch größer und man erhält so die Spectra der dritten Ordnung. Diese vermehren sich mit wachsender Anzahl der Oeffnungen und werden dabei immer undeutlicher.

Wir haben schon oben die Erscheinung beschrieben, welche durch weißes Licht bei einem Spalte hervorgebracht wird. Bei zwei Spaltöffnungen entstehen nun, wenn man statt des gleichartigen Lichts weißes anwendet, in der Mitte des Gesichtsfeldes farbige Bilder, welche jenen weißen Streifen, der die Mitte der ganzen Erscheinung einnimmt, durchschneiden, so daß nur noch die Mittellinie des Gesichtsfeldes einen schmalen weißen Streifen bildet. Die oben besprochenen äußeren Farbenbilder erleiden dabei nur eine geringe Veränderung. Aber die Farbenbilder in der Mitte des Gesichtsfeldes vermehren sich und nehmen zugleich an Breite ab, wenn man drei oder noch mehr Oeffnungen neben einander bringt.

Stellt man nach Fraunhofer vor das Fernrohr eine ganze Reihe paralleler Oeffnungen, welche zusammen ein Gitter darstellen, so beobachtet man, wenn man durch das Fernrohr nach einer Lichtlinie sieht, welche jenen Oeffnungen parallel ist, eine Reihe farbiger Streifen, die in der Ordnung der prismatischen Farben auf einander folgen. Wendet man homogenes Licht an, so sieht man in der Mitte des Gesichtsfeldes das schmale Bild der Lichtlinie und zu beiden Seiten desselben einfarbige helle Streifen.

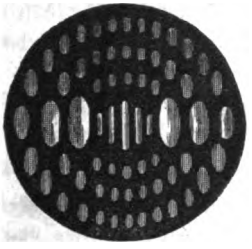
Man erhält solche Gitter, wenn man dünnen Gold- oder Silberdraht in die Gänge sehr feiner Schrauben spannt oder wenn man in ein mit Goldblatt belegtes Planglas Parallellinien radirt, oder

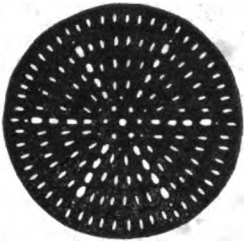
Digitized by Google

auch dadurch, daß man mittelſt eines Diamanten die Parallellinien in ein Planglas ſchneidet.

Beſonders prachtvolle, ſymmetriſche Farbenerſcheinungen beobachtet man, wenn mehrere runde oder eckige Oeffnungen vor das Objectiv des Fernrohres gebracht werden. So erhält man durch zwei kleine, runde Oeffnungen von gleicher Größe die Erſcheinung, welche Fig. 1

Fig. 1. Fig. 2.





andeutet, wo die weißen Räume bei Anwendung von weißem Lichte farbige Bilder enthalten; durch drei Oeffnungen, deren Mittelpunkte ein gleichſeitiges Dreieck darſtellen, erhält man die Fig. 2. Herſchel unterſuchte die Beugungserſcheinungen, welche durch mehrere dreieckige, quadratiſche und kreisförmige Oeffnungen erzeugt werden.

Man kann dergleichen Beugungserſcheinungen auch ohne Fernrohr und ohne daß man ſich in einem dunkelen Zimmer befindet, nach Schwerd einfach beobachten, indem man das feine Gitter vor das Auge hält und nach einem Lichtpunkte oder nach einer Lichtlinie hinſieht. Als Lichtpunkt läßt ſich aber das Spiegelbildchen der Sonne benutzen, welches auf einem polirten Metallknopfe, auf einer gefüllten Thermometerkugel oder an der converen Fläche eines geſchwärzten Uhrglaſes entſteht; eine leuchtende Linie erhält man durch Spiegelung einer Stricknadel, einer Glasröhre u. dgl. im Sonnenlichte.

53. Es laſſen ſich leicht einige Verſuche anſtellen, deren Reſultate mit den erwähnten Beugungserſcheinungen in nahem Zuſammenhange ſtehen und ganz zu Gunſten der Vibrationstheorie ſprechen. Ein Verſuch dieſer Art wurde ſchon von Grimaldi gemacht. Man laſſe nämlich durch zwei feine, nahe bei einander ſtehende Oeffnungen Sonnenſtrahlen in ein dunkeles Zimmer dringen und fange ſie auf einem weißen Schirme auf. Alsdann bemerkt man auf dem letzteren zwei helle Kreiſe, welche ſich bei einer gewiſſen Entfernung des Schirmes von den Oeffnungen theilweiſe decken. Solche Stellen nun, welche von beiden Oeffnungen zugleich Licht erhalten, erſcheinen zwar der natürlichen Erwartung gemäß heller als andere Stellen, denen nur

Digitized by Google

von einer Oeffnung Licht zukommt, aber an der Grenze des doppelt beleuchteten Raumes bemerkt man auch dunkele Streifen, obgleich die Stellen, wo sie hinfallen, noch von beiden Oeffnungen Licht erhalten. Diese Streifen sind viel dunkeler als jene Stellen, welche nur von einer Oeffnung Licht empfangen, und es folgt daraus, daß durch Hinzukommen von Licht zu Licht Dunkelheit entstehen kann. Hält man eine Oeffnung zu, damit nur durch die andere Licht auf den Schirm fällt, so verschwinden sogleich die dunkelen Streifen. Schon Grimaldi wurde durch diese Erscheinung auf den Gedanken einer wellenartigen Fortpflanzung des Lichts geführt.

Später untersuchte Young die hellen und dunkelen Streifen, welche hinter einem schmalen Körper, auf den ein leuchtender Punkt oder eine leuchtende Linie Strahlen sendet, entstehen. Auch er sah diese Streifen sogleich verschwinden, wenn er das Licht an der einen Seite des schmalen Körpers vorbeizugehen hinderte. Dieser Versuch giebt also dasselbe Resultat wie der vorige, nämlich, daß Lichtstrahlen, welche nahe nach derselben Richtung fortgehen, sich im Falle des Zusammentreffens je nach den Umständen gegenseitig verstärken oder vernichten können. Nimmt man eine Fortpflanzung des Lichts durch Wellenbewegung an, so sieht man leicht ein, daß zwei Lichtstrahlen, welche in einem Punkte hinter dem schmalen Körper zusammentreffen, sich gegenseitig verstärken oder vernichten müssen, je nachdem sie daselbst mit gleichen oder entgegengesetzten Schwingungszuständen anlangen. Das letztere hängt aber von dem Unterschiede der Wege ab, welche die beiden Strahlen von der Lichtquelle bis zum Punkte durchlaufen. Auch hat Young wirklich nachgewiesen, daß diese Wege von ungleicher Länge sind, je nachdem die Strahlen auf der einen oder der anderen Seite des schmalen Körpers vorübergehen.

Wir haben im §. 48 gesehen, daß zwei Aethertheilchen, welche auf dem Wege eines Lichtstrahles liegen, sich in gleichen Schwingungszuständen befinden, wenn sie um eine ganze Wellenlänge oder um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge von einander entfernt sind, daß aber zwei Aethertheilchen, deren Entfernung eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt, sich in entgegengesetzten Schwingungszuständen befinden. Man nehme nun an, daß zwei Strahlen von der Lichtquelle aus auf verschiedenen Wegen zu einem Punkte gelangen, in dem sie sich unter einem sehr spitzen Winkel schneiden. Sind die Wege beider Strahlen von der Lichtquelle bis zu dem angenommenen Punkte gleich groß oder ist der Weg des einen Strahles um eine oder um

Digitized by Google

mehrere ganze Wellenlängen größer als der des anderen Strahles, so wirken beide Strahlen in jenem Punkte, wo sie sich treffen, zu demselben Effecte zusammen, d. h. das in diesem Punkte befindliche Aethertheilchen wird durch beide Wellensysteme auf dieselbe Weise in Bewegung gesetzt, so daß seine Schwingungsintensität doppelt so groß ist, als wenn nur die Schwingungen des einen Lichtstrahles seine Bewegung bestimmt hätten. Beträgt aber der Unterschied zwischen den Wegen beider Strahlen eine halbe oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge, so wird das in jenem Punkte befindliche Aethertheilchen von beiden Wellensystemen auf entgegengesetzte Weise angeregt, dergestalt, daß die Vibrationen des einen Strahles das Theilchen in demselben Moment nach oben treiben, während es durch die Vibrationen des anderen nach unten getrieben wird. Da sich aber diese entgegengesetzten Wirkungen aufheben, so muß das Aethertheilchen in Ruhe bleiben.

Hiernach sieht man leicht, daß in den Fällen, wo der Gangunterschied beider Strahlen weder ein Vielfaches einer ganzen noch ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt, eben so wenig eine Verdoppelung der Schwingungsintensität als eine völlige Vernichtung der Schwingungen statthaben kann, sondern daß eine mittlere Wirkung eintreten muß, nämlich eine bloße Verstärkung oder Schwächung des Lichts, je nachdem der Unterschied zwischen den Wegen beider Strahlen mehr dem Vielfachen einer ganzen oder dem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge nahe kommt.

Nach Young nennt man eine solche gegenseitige Einwirkung der Lichtstrahlen die Interferenz des Lichts.

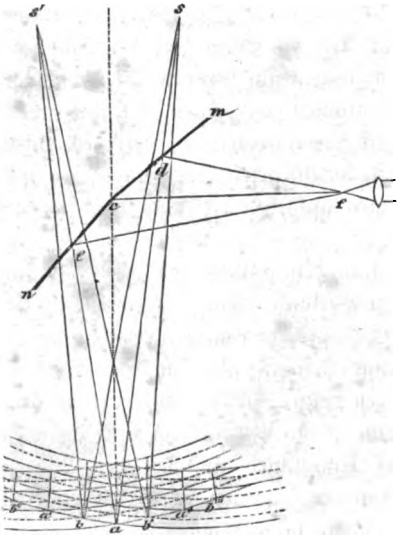
54. Die Vibrationstheorie zeigt also, wie durch das Zusammenwirken mehrerer Lichtstrahlen je nach den Umständen bald eine größere Helligkeit, bald aber auch Dunkelheit hervorgebracht werden kann, während man nach der Emanationstheorie wohl das erstere, aber fast gar nicht das letztere begreift.

Daß solche Interferenzen des Lichts in der Wirklichkeit vorkommen, geht aus dem sogenannten Fresnel'schen Spiegelversuche, wo sich ungebeugtes Licht auf die oben angegebene Weise gegenseitig vernichtet, unzweideutig hervor. Es werden nämlich zwei Metallspiegel oder zwei Stücke von geschliffenem Spiegelglase, deren Rückseite geschwärzt ist, so mit einander verbunden, daß sie einen sehr stumpfen Winkel, der nur wenig von 180° verschieden ist, mit einander machen. Da, wo beide Spiegel an einander grenzen, müssen sie genau zusammenpassen, so daß keiner über den anderen im Geringsten hervorragt.

Digitized by Google

Der Sicherheit wegen befinden ſich beide Spiegel an einer Faſſung, welche mit einigen Schrauben und einer Feder verſehen iſt, die gegen den einen Spiegel drückt. Hierdurch kann man den Winkel beider Spiegel willkürlich ändern.

Fallen nun von einem leuchtenden Punkte f Strahlen auf beide Spiegel, ſo müſſen in s und s′ zwei einander ſehr nahe liegende Spiegelbilder des leuchtenden Punktes entſtehen. Die von den Spiegeln reflectirten Strahlen werden ſich aber in einer gewiſſen Entfernung vom Apparate durchſchneiden, wodurch ſich bei Anwendung von homogenem Lichte eine Reihe abwechſelnd heller und dunkler Streifen bildet. So zeigt ſich im Punkte a, welcher gleichweit von s und s′ entfernt iſt, ein heller Streifen, in b und b′ ein dunkler, in a′ und a″ wieder ein heller, in b″ und b‴ wieder ein dunkler, u. ſ. f. Bekanntlich werden die von dem Punkte f kommenden Strahlen von den Spiegeln ſo reflectirt, als ob ſie von den Spiegelbildern s und s′ herkämen, von denen jedes in eben der Entfernung hinter dem entſprechenden Spiegel erſcheint, in welcher der leuchtende Punkt vor demſelben liegt. Alle Aethertheilchen, welche einen Strahl, wie da, fortpflanzen, oscilliren ſenkrecht zu da, d. h. ſenkrecht zur Fortpflanzungsrichtung des Strahles. Denkt man ſich von s als Mittelpunkt einen Kreis durch a gezogen, ſo werden alle auf dieſem Kreiſe liegenden Aethertheilchen, wie a, b, a′, b″, .. durch die vom Spiegel cm reflectirten Strahlen in denſelben Schwingungszuſtand verſetzt, ſo daß ſie alle in demſelben Augenblicke nach derſelben Richtung vibriren. Man denke ſich ferner von s aus durch b′ einen Kreis gezogen, welcher mit dem vorigen parallel ſein wird. Der Halbmeſſer dieſes Kreiſes iſt aber kleiner als der des vorigen. Iſt nun der Unterſchied beider Halbmeſſer gleich einer halben Wellenlänge, ſo müſſen nach unſeren früheren Betrachtungen alle Aethertheilchen auf dem zweiten Kreiſe in einer Richtung ſchwingen, welche derjenigen entgegengeſetzt iſt, worin



Digitized by Google

ſich die Aethertheilchen auf dem erſten Kreiſe bewegen. So kann man fortfahren, um den Punkt s Kreiſe zu ziehen; die Entfernung zwiſchen zwei ausgezogenen Kreiſen beträgt eine ganze, die Entfernung zwiſchen einem ausgezogenen und einem punktirten Kreiſe aber eine halbe Wellenlänge. Zieht man auf dieſelbe Weiſe auch um den Punkt s′ Kreiſe, ſo ergiebt ſich daraus der Schwingungszuſtand der Aethertheilchen, welche durch die von dem Spiegel cn reflectirten Strahlen in Bewegung gebracht werden.

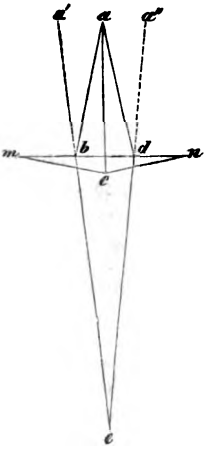
Da der Punkt a von den Punkten s und s′ in gleicher Entfernung liegt, ſo ſind auch die Wege sda und sea einander gleich, mithin wird das Aethertheilchen in a von den beiden Wellenſyſtemen, welche die genannten Strahlen fortpflanzen, nach derſelben Richtung getrieben und ſeine Vibrationsintenſität iſt doppelt ſo groß, als wenn es nur durch ein Wellenſyſtem in Bewegung geſetzt würde. Das Theilchen in b erleidet von den durch den Spiegel cm reflectirten Strahlen dieſelbe Einwirkung wie das Theilchen in a, dagegen von dem durch den Spiegel cn reflectirten Wellenſyſteme die gerade entgegengeſetzte; beide Einwirkungen heben ſich auf, wodurch hier Dunkelheit entſteht. Aehnliches gilt von den übrigen Punkten; in a′ und a″, wie überhaupt in allen Punkten, wo ſich zwei ausgezogene oder zwei punktirte Kreiſe durchſchneiden, wird die Lichtintenſität vermehrt, denn beide Wellenſyſteme wirken hier zuſammen, da die Differenz der Wege einer ganzen Wellenlänge gleich iſt. In allen jenen Punkten aber, wo ſich ein ausgezogener und ein punktirter Kreis durchſchneiden, wirken beide Wellenſyſteme einander entgegen und es entſteht Dunkelheit, da hier die Differenz der Wege eine halbe Wellenlänge beträgt. Es läßt ſich nun wirklich nachweiſen, daß die Wege der Strahlen von der Lichtquelle aus bis zu den Punkten a, b′, a″, b‴, ... von ungleicher Länge ſind, daß aber die Differenz dieſer Wege ſtets gleich iſt, nämlich sa — sb′ = sb′ — sa″ = sa″ — sb‴ .... Um die Wege in Zahlen zu erhalten, hat man nur nöthig, bei gegebenem Neigungswinkel beider Spiegel die Entfernung eines dunkelen Streifens vom anderen und die Entfernung der Lichtquelle von den Spiegeln zu meſſen. Hiernach läßt ſich leicht jene Differenz der Wege, welche gleich einer halben Wellenlänge iſt, berechnen.

Als Lichtquelle kann man bei dieſem Verſuche das Sonnenbildchen im Brennpunkte einer Linſe von kurzer Brennweite oder das auf einem Metallknopfe u. dgl. erzeugte Sonnenbild benutzen. Noch beſſer iſt eine Lichtlinie, welche man entweder im Laden eines dunkelen Zimmers vermittelſt eines ſchmalen verticalen Spaltes, durch den man die

Digitized by Google

Strahlen mit Hilfe eines vor dem Laden angebrachten Spiegels in horizontaler Richtung eintreten läßt, hervorbringt oder dadurch, daß man die Spalte vor die Flamme einer Argand'schen Lampe setzt. Fresnel bediente sich zum Hervorbringen der Lichtlinie einer Cylinderlinse, welche aus zwei Cylindersegmenten zusammengesetzt ist. Statt des Brennpunktes der gewöhnlichen Linse hat man hier einen leuchtenden Streifen als Brennlinie. Die Interferenzstreifen selbst beobachtet man durch eine Loupe.

Diese Streifen lassen sich auch durch ein Prisma hervorbringen, dessen Flächen cm und cn einen sehr stumpfen Winkel mit einander machen. Die Strahlen ab und ad, welche ein leuchtender Punkt in a auf das Prisma sendet, werden nach ihrem Durchgange durch das letztere sich so fortbewegen, als ob sie von den Punkten a', a'' herkämen, und in einem Punkte e zusammentreffen, wo sie auf ähnliche Weise wie bei jenen Spiegeln zur Interferenz kommen müssen. —



Läßt man die Interferenzstreifen für verschiedene homogene Lichtsorten entstehen, so überzeugt man sich, daß ihre Breite für rothes Licht am größten, für violetes am kleinsten ist. Man muß daraus schließen, daß die Wellenlänge für die rothen Strahlen größer als für die violeten ist. Wendet man weißes Licht an, so bemerkt man um die Streifen farbige Säume, welche mit der Breite der Streifen an Deutlichkeit gewinnen. Man sieht leicht ein, daß das Interferenzphänomen für weißes Licht aus allen jenen Interferenzerscheinungen resultiren muß, welche die einzelnen homogenen Farbestrahlen für sich hervorbringen. So gewahrt man in der Mitte, wo Strahlen von allen Farben zusammentreffen, einen weißen Streifen. Die übrigen Streifen können aber weder rein weiß noch rein schwarz erscheinen, weil die hellen und dunkelen Streifen für die verschiedenen Farbestrahlen nicht genau an dieselben Stellen fallen, daher die farbigen Säume dieser Streifen. —

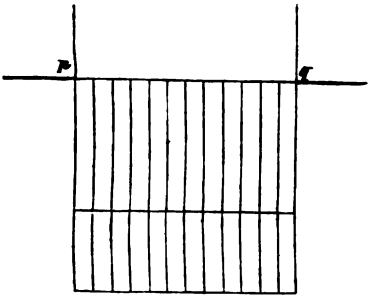
Durch das Princip der Interferenz des Lichts wurde von Fresnel die Erklärung der Reflexion des Lichts nach der Vibrationstheorie vervollständigt. Er zeigte nämlich die Möglichkeit, daß, während sich die in der Einfallsebene reflectirten Strahlen wegen der Gleichheit des Schwingungszustandes gegenseitig unterstützen, die von denselben

Digitized by Google

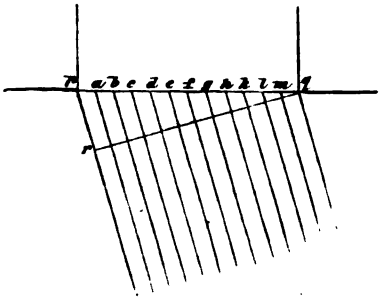
Punkten der spiegelnden Oberfläche seitwärts ausgehenden Vibrationen durch Interferenz aufgehoben werden.

Die Erklärung der früher besprochenen Beugungserscheinungen läßt sich nun, wie wir bald sehen werden, auf die der Interferenzerscheinungen, welche ganz zu Gunsten der Vibrationstheorie sprechen, zurückführen, so daß auch hierdurch die Ueberzeugung von der Richtigkeit dieser Theorie an Stärke gewinnt.

55. Durch eine feine Spalte p q dringe senkrecht von einem entfernten, leuchtenden Punkte ein Lichtbündel, dergestalt also, daß sich die einzelnen Strahlen desselben als unter einander parallel betrachten lassen. Werden nun alle Aethertheilchen innerhalb der Oeffnung p q von den einfallenden Wellen auf gleiche Weise in Bewegung gesetzt, so wird jedes Aethertheilchen ein Mittelpunkt neuer Wellen, welche das Licht auch jenseits der Oeffnung mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen. Alle Aethertheilchen, welche auf irgend einer zur Richtung der Strahlen senkrechten Linie liegen, befinden sich hiernach in gleichen Schwingungszuständen. Treffen daher die Strahlen des Bündels in einem Punkte der Netzhaut oder in dem Brennpunkte einer Linse zusammen, so werden sie sich gegenseitig unterstützen und zwar muß die Schwingungsintensität, welche sie zusammen hervorbringen, gleich sein der Summe der Schwingungsintensitäten aller einzelnen Strahlen.



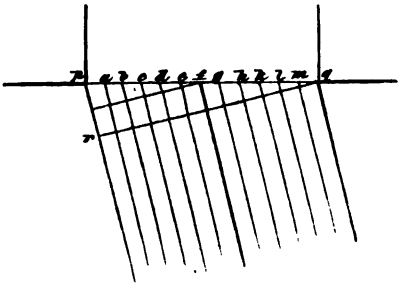
Pflanzt sich aber von der Oeffnung p q aus ein Strahlenbündel fort, das unter einem bestimmten Winkel gegen die Oeffnung geneigt ist, so ziehe man von q auf den Strahl p die Senkrechte q r; dann ist p r der Gangunterschied zwischen den Randstrahlen p und q. Ist dieser Unterschied gleich ½ Wellenlänge, so befinden sich bekanntlich die beiden Randstrahlen stets in entgegengesetzten Schwingungszuständen und müssen sich daher in ihren Wirkungen aufheben, wenn sie irgendwo zusammentreffen. Die zwi-



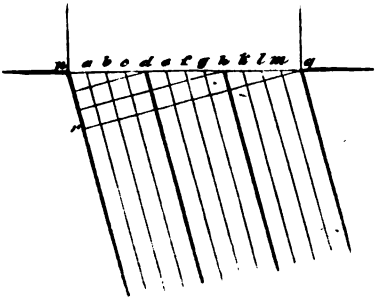
Digitized by Google

ſchenliegenden Strahlen wirken zuſammen, da hinſichtlich ihrer kein Gegenſatz des Schwingungszuſtandes beſteht.

Beträgt der Gangunterſchied p r der Randſtrahlen zwei halbe Wellenlängen, ſo iſt der Unterſchied zwiſchen den Wegen der Strahlen



q und f, von denen letzterer in der Mitte des Bündels liegt, gleich ½ Wellenlänge. Dieſe Strahlen müſſen ſich alſo vernichten, was auch von den Strahlen m und e, l und d, k und c, h und b, g und a gilt. Demnach iſt die Wirkung aller Strahlen gleich Null. Wenn der Gangunterſchied p r der äußerſten Lichtſtrahlen drei halbe Wellenlängen beträgt, ſo iſt er für die Strahlen



p und d, d und h, h und q gleich ½ Wellenlänge, für die Strahlen p und h aber 2 halbe Wellenlängen. Mit den beiden erſten Bündeln p d und d h verhält es ſich daher wie im vorigen Falle, ſie heben ſich gegenſeitig auf. Nur das letzte Bündel bringt eine merkliche Wirkung hervor; die Schwingungsintenſität deſſelben iſt drei Mal ſchwächer, als wenn alle drei Bündel hätten zuſammen wirken können, ſo daß die Lichtſtärke gleich ⅑ iſt, inſofern dieſe dem Quadrate der Schwingungsintenſität proportional geſetzt wird.

Bei einem Gangunterſchiede von vier halben Wellenlängen findet wieder eine vollkommene Vernichtung ſtatt, wie ſich leicht ergiebt, wenn man ſich das ganze Lichtbündel in 4 gleiche Theile zerlegt denkt.

Iſt der Gangunterſchied der Strahlen fünf halben Wellenlängen gleich, ſo denke man ſich das ganze Bündel in 5 gleiche Theile zerlegt. Es findet dann zwiſchen den 4 erſten, wie im vorigen Falle, ein vollkommener Gegenſatz ſtatt. Das letzte Bündel, welches gleich ⅕ des ganzen iſt, hat dann noch eine Schwingungsintenſität, welche fünf Mal ſchwächer iſt als ſie beim Zuſammenwirken aller Strahlen ſein würde. Die noch übrig bleibende Lichtſtärke iſt daher gleich $^1/_{25}$.

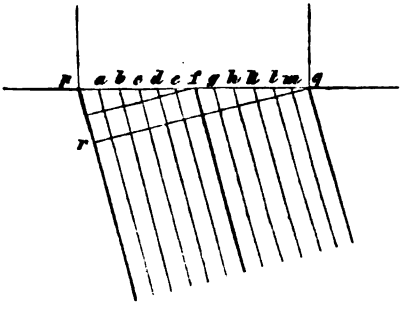
Digitized by Google

Auf diese Weise überzeugt man sich, daß die Gesammtwirkung der Strahlen eines gebeugten Bündels immer gleich Null ist, wenn der Gangunterschied der Randstrahlen 2, 4, 6, 8, .. halbe Wellenlängen, überhaupt ein gerades Vielfache einer halben Wellenlänge ist, daß aber immer noch ein Theil der Strahlen wirksam bleibt, wenn der Gangunterschied 1, 3, 5, 7, ... halbe Wellenlängen, d. h. ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt.

So entstehen nun auch jene hellen und dunkelen Streifen, welche bei homogenem Lichte durch eine schmale, verticale Spalte zum Vorschein kommen, wenn man bedenkt, daß die Beugung der Lichtstrahlen zu beiden Seiten der Spalte stattfindet. In der Mitte gewahrt man einen weißen Streifen, zu dessen beiden Seiten helle Streifen, durch dunkele Zwischenräume getrennt, in gleichen Abständen auf einander folgen. Mit der Entfernung von der Mitte nehmen die hellen Streifen auf die oben angegebene Weise an Lichtstärke ab.

Will man die Winkelabstände der dunkelen Streifen von der Mitte der ganzen Erscheinung messen, so bringe man nach Schwerd die beugende Spalte vor das Objectiv eines Theodoliten und richte das Fernrohr so, daß der verticale Theil des Fadenkreuzes gerade mit der Mitte des ganzen Bildes zusammenfällt. Alsdann bringt man nach und nach jeden schwarzen Streifen mit dem verticalen Faden zum Decken, indem man das Fernrohr allmälig dreht. Die Winkelwerthe der Drehung liest man aber am horizontalen Kreise des Theodoliten mit Hilfe des Nonius ab.

Betrachtet man nebenstehende Figur, so ist in dem Dreiecke



$pqr : \frac{pr}{pq} = \sin \alpha$, wo α den Beugungswinkel pqr, d. h. den Winkel bezeichnet, welchen das gebeugte Strahlenbündel mit der Richtung der einfallenden Strahlen macht. Aus diesem Ausdrucke erkennt man, daß der Winkel α oder die Breite des Spectrums um so größer wird, je kleiner pq, nämlich die Breite des Spaltes, und je größer pr oder die Wellenlänge des Lichtes ist. Auch hat es keine Schwierigkeit, nach dieser Formel die Länge irgend einer Lichtwelle zu berechnen, sofern die Breite des Spaltes und der Beugungswinkel α bekannt sind. Den letzteren erhält man aber, wenn man den Winkelabstand zweier

Digitized by Google

auf einander folgender dunkeler Streifen nach der oben angegebenen Methode bestimmt. Die Formel giebt dann die Wellenlänge $pr = pq \sin \alpha$. Für rothes Licht sind jene Spectra breiter als für die übrigen Farbestrahlen, so daß sie für die violeten am schmälsten sind. Daher giebt auch die Formel für die rothen Strahlen eine viel größere Wellenlänge als für die violeten.

Fraunhofer fand für die Wellenlänge der Strahlen, welche den Stellen B, C, D, E, F, G, H im Sonnenspectrum entsprechen, folgende Werthe im Pariser Zoll:

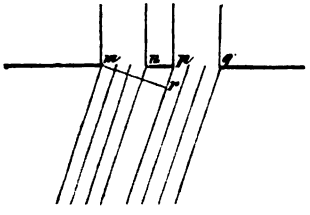
Für B	0,00002541
" C	0,00002422
" D	0,00002175
" E	0,00001945
" F	0,00001794
" G	0,00001587
" H	0,00001464

Bezeichnet man durch c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen, durch t die Schwingungsdauer und durch l, wie oben, die Wellenlänge, so wird der Zusammenhang zwischen diesen drei Größen durch die Formel $l = ct$ ausgedrückt, eine Gleichung, welche wir schon in der Lehre vom Schalle kennen gelernt haben. Die Anzahl der Schwingungen in 1 Secunde ist aber $n = \frac{c}{l}$. Hieraus läßt sich nun für einen bestimmten Farbestrahl die Schwingungszahl in 1 Secunde leicht berechnen, wenn man für l die entsprechende Wellenlänge und für c die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in der Secunde, nämlich 40000 Meilen setzt. Nach Herschel machen die Aethertheilchen, wenn sie das äußerste Roth erzeugen, 458 Billionen Schwingungen, und für das äußerste Violet 727 Billionen Schwingungen in 1 Secunde.

56. Befinden sich in einem Schirme zwei gleiche Spalten neben einander, so muß natürlich jede Spalte, wenn homogene Lichtstrahlen senkrecht darauf fallen, eine der oben besprochenen ähnliche Erscheinung hervorbringen. Werden die von beiden Oeffnungen in paralleler Richtung fortgehenden Strahlen in einem Punkte, wie im Brennpunkte eines Fernrohrobjectivs, vereinigt, so erleiden zwar die dunkelen Stellen, welche eine Oeffnung giebt, keine Veränderung, wohl aber die hellen, indem sie von dunkelen Streifen, welche durch das Hinzukommen der zweiten Oeffnung entstehen, durchschnitten werden. Zunächst sieht man, daß die Mitte der Erscheinung bei zwei Oeffnungen, wie

Digitized by Google

bei einer, hell sein wird, da alle Strahlen, welche sich rechtwinklig zur Oeffnung fortpflanzen, wegen Gleichheit des Schwingungszustandes sich gegenseitig unterstützen müssen. Beträgt nun der Gangunterschied der Randstrahlen bei einem jeden der gebeugten Bündel m n und p q



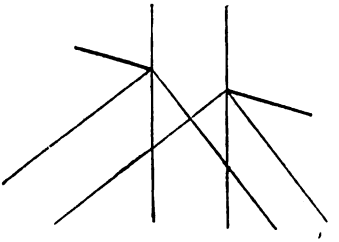
$^1/_4$ Wellenlänge, so wird der Gangunterschied der Randstrahlen m und p $^1/_2$ Wellenlänge betragen; beide Strahlenbündel werden sich daher gegenseitig aufheben und einen dunkelen Streifen erzeugen. Ebenso entsteht ein zweiter dunkeler Streifen, wenn bei zwei Strahlenbündeln der Gangunterschied p r der Randstrahlen gleich $^3/_2$ Wellenlängen ist, wenn also der Gangunterschied der Randstrahlen eines jeden der gebeugten Bündel $^3/_4$ Wellenlänge beträgt. Ein nächster dunkeler Streifen ergiebt sich da, wo der Gangunterschied der Randstrahlen zweier Bündel $^5/_2$ Wellenlängen gleichkommt oder wenn der Gangunterschied der Randstrahlen eines jeden Bündels $^5/_4$ Wellenlängen beträgt, u. s. w.

Von diesen dunkelen Streifen werden die Seitenspectra, welche eine Oeffnung giebt, durchschnitten, wodurch jene Fraunhofer'sche Spectra zweiter Klasse entstehen. Befinden sich im Schirme drei oder noch mehrere parallele, gleichweit von einander abstehende Spaltöffnungen, so wird in Folge gegenseitiger Interferenz der den einzelnen Oeffnungen entsprechenden Bündel die Zahl jener dunkelen Streifen vermehrt und man erhält die Fraunhofer'schen Spectra dritter Klasse.

Auf dieselbe Weise ergiebt sich die Erklärung der Beugungserscheinungen, welche Fraunhofer durch eine ganze Reihe paralleler Spalten oder durch ein Gitter hervorbrachte. Auf eben dem Principe beruhen auch jene Spectra, welche durch eine dreieckige oder kreisförmige Oeffnung oder durch eine Reihe von Dreiecken, Kreisen u. dgl. entstehen. Ueberhaupt läßt sich die Gestalt des Spectrums für irgend eine Oeffnung oder eine beliebige Anzahl derselben vorausbestimmen. Eine vollständige Erklärung aller Beugungserscheinungen mit allen Einzelheiten findet sich in Schwerd's Werke: die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalgesetzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt, Mannheim 1835.

Wenn das Licht nicht senkrecht, sondern in schiefer Richtung auf die Oeffnung fällt, so werden sich die innerhalb der Oeffnung befindlichen Aethertheilchen für denselben Moment nicht in einerlei, sondern in

Digitized by Google



verschiedenen Schwingungszuständen befinden. Die Anordnung der Spectra ist dann zu beiden Seiten nicht mehr symmetrisch, da der Gangunterschied der Randstrahlen auf der einen Seite größer sein wird als auf der anderen.

57. Läßt man die bisher besprochenen Beugungserscheinungen durch weißes Licht entstehen, so giebt jede homogene Farbe desselben ihr eigenes Spectrum, welches, wie wir schon bemerkt haben, für die rothen Strahlen am größten, für die violeten am kleinsten ist. Da nun die hellen und dunkelen Streifen dieser einzelnen Spectra nicht zusammenfallen können, so muß das durch weißes Licht hervorgebrachte Beugungsbild an bestimmten Stellen farbig erscheinen.

Auf ähnliche Weise erklären sich die Farbenspiele, welche man wahrnimmt, wenn man durch ein Stück Mousselin, Flor, Drahttuch, Seidenband oder durch den Bart einer Vogelfeder nach einem Lichtpunkte hinsieht. Ebenso das Farbenspiel an den feinen Haaren der Hüte, wenn man durch sie die Sonne betrachtet oder wenn man durch ein mit Herenmehl bestreutes Glas nach einer Kerzenflamme hinsieht, u. s. w. Auch gehört hierher das Farbenspiel fein gestreifter Oberflächen, wie der Barton'schen Irisknöpfe, der Perlmutter, im reflectirten Lichte. Diese Farben entstehen auch, wenn man die Oberflächen dieser Körper in Wachs abdrückt, zum Zeichen, daß sie nur von der Gestalt der Oberfläche bedingt werden und wie alle Beugungserscheinungen von der materiellen Beschaffenheit der Körper unabhängig sind.

Nicht minder erklären sich durch die Beugung des Lichts nach Fraunhofer die Höfe, welche man häufig um Sonne, Mond uud die größeren Sterne erblickt. Die kleineren Höfe, welche mit dem Körper, den sie umgeben, zusammenhängen, erscheinen mitunter nach außen roth gefärbt und haben bald einen größeren, bald einen kleineren Durchmesser. Diese Höfe erklärt Fraunhofer aus einer Beugung der Lichtstrahlen, indem sie an den Rändern der in der Atmosphäre schwebenden Dunstkügelchen vorübergehen; er zeigt, daß diese Beugung eben so geschieht, als wenn das Licht durch eine Oeffnung geht, welche mit den Kügelchen gleichen Durchmesser hat. Bringt man nach Fraunhofer vor das Objectiv eines Fernrohres sehr viele, gleiche große Glaskügelchen und läßt man auf diese durch eine runde Oeffnung Lichtstrahlen fallen, so sieht man im Gesichtsfelde des Fernrohres Farbenringe, welche mit jenen Höfen vollständige Aehnlichkeit haben.

Digitized by Google

Je kleiner die Glaskügelchen sind, desto größer erscheinen die Ringe, und daher muß auch der Durchmesser der Höfe um so größer sein, je kleiner die Dunstkügelchen sind. Auch haben diese Höfe eine auffallende Aehnlichkeit mit der Erscheinung, welche man an einer Kerzenflamme wahrnimmt, wenn man dieselbe durch ein mit semen lycopodii bestreutes Glas ansieht. Die Dunstkügelchen spielen bei der Erzeugung der Höfe die Rolle der feinen Staubtheilchen. Solche Höfe lassen sich daher ohne Zweifel als eine Interferenzerscheinung betrachten.

Die größeren Höfe, welche von dem leuchtenden Körper getrennt erscheinen und oft einen Durchmesser von 45° haben, erklärt Fraunhofer durch die Brechung des Lichts in Eiskrystallen aus sechsseitigen oder dreiseitigen Prismen. Wenn diese Prismen pyramidal zugespitzt sind, so ergeben sich daraus durch die Brechung des Lichts auch die zweiten größeren Höfe, welche mitunter neben den ersten in größerer Entfernung vom leuchtenden Körper gesehen werden.

Außer jenen Höfen beobachtet man noch, namentlich bei trüber Luft und kalter Witterung, die sogenannten Nebensonnen und Nebenmonde, welche am Umfange eines weißlichen, horizontalen Kreises erscheinen, der von farbigen, verticalen Ringen durchschnitten wird. Auch diese Erscheinung suchte Fraunhofer durch die Beugung des Lichts an den Dunstkügelchen zu erklären. Die Erscheinung einer Nebensonne läßt sich hervorbringen, wenn man auf einem mit Gold belegten Glase in gleichen Abständen parallele Linien zieht und durch das so entstandene Gitter die Sonne betrachtet. Zieht man aber die parallelen Linien in ungleichen Abständen von einander, so sieht man zu beiden Seiten der Sonne, wenn man sie durch das Glas bei verticaler Stellung jener Linien betrachtet, einen horizontalen weißen Lichtstreifen, welcher so breit wie der scheinbare Durchmesser der Sonne ist. Denkt man sich nun Dunstkügelchen in einer solchen Anordnung in Beziehung auf das Auge und das von der Sonne kommende Licht wie jene Linien, so bemerkt man wohl, daß eine Beugung des Lichts an den Dunstbläschen die erwähnten Erscheinungen hervorbringen kann. Doch lassen sich dieselben nach Huyghens eben so gut aus der Reflexion der Sonnenstrahlen an den Flächen prismatischer Eisnadeln ableiten.

58. Dünne Plättchen durchsichtiger Substanzen, wie dünne Glas- und Glimmerplättchen, zeigen dem Sonnenlichte ausgesetzt eine lebhafte Färbung, welche von der Dicke der Plättchen und dem Einfallswinkel des Lichts abhängt. Besonders auffallend nimmt man diese Färbung an Seifenblasen wahr. Ein ähnliches Farbenspiel

Digitized by Google

beobachtet man an dünnen auf Waſſer ſchwimmenden Oelſchichten, ebenſo an dünnen Luftſchichten in den Sprüngen der Kryſtalle oder dicker Glasmaſſen, an Fiſchſchuppen, u. ſ. w.

Schon von Newton ſind die Geſetze dieſer Farbenerſcheinungen genau unterſucht worden. Legt man Fig. 1 auf eine Glastafel eine Conveꝛlinſe von großem Halbmeſſer, ſo bemerkt man da, wo die Linſe die Glasplatte berührt, einen ſchwarzen Fleck, welchen mehrere concentriſche Farbenringe umgeben. Dieſe Ringe werden nach außen hin immer ſchmäler und matter. Die Ordnung der Farben iſt aber von der Mitte aus folgende: 1. Ring: Schwarz, blau, weiß, gelb, orange, roth. 2. Ring: Violet, indigoblau, blau, grün, gelb, orange, hellroth, ſcharlachroth. 3. Ring: Purpurroth, indigoblau, blau, grün, roth, bläulichroth. 4. Ring: Bläulichgrün, grün, roth. 5. Ring: Grünlichblau, blaßroth. 6. Ring: Grünlichblau, röthlichweiß. 7. Ring: Grünlichblau, ſchwach röthlichweiß.

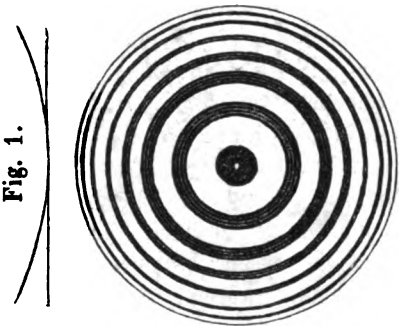


Fig. 1.

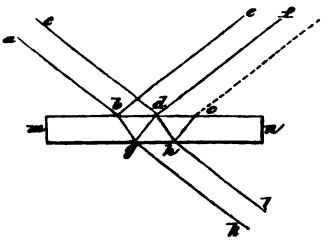
Wenn man ſtatt des weißen Lichtes homogenes anwendet, z. B. das Licht einer Weingeiſtflamme, ſo bemerkt man nur abwechſelnd helle und dunkele Ringe, deren Durchmeſſer Newton mit großer Genauigkeit gemeſſen hat. Für reflectirtes Licht verhalten ſich die Quadrate der Halbmeſſer der hellen Ringe wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7, ..., während ſich bei den dunkelen Ringen die Quadrate der Halbmeſſer wie die geraden Zahlen 2, 4, 6, 8, ... verhalten. Wird die Erſcheinung vermittelſt durchgelaſſenen Lichtes erzeugt, ſo bilden ſich an den Stellen, wo ſich im reflectirten Lichte helle Ringe zeigen, dunkele, und umgekehrt. Daher findet bei durchgehendem Lichte für die dunkeln Ringe daſſelbe Verhältniß ſtatt, wie bei reflectirtem Lichte für die hellen, und umgekehrt. Für verſchiedene einfache Farben ſind die Durchmeſſer der hellen und dunkelen Ringe von verſchiedener Größe; ſie ſind für die violete am kleinſten, für die rothe Farbe am größten. Hieraus folgt, daß der Abſtand zwiſchen beiden Gläſern oder die Dicke der Luftſchicht, welche der Mitte eines beſtimmten Ringes entſpricht, für verſchiedene Farben ungleich ſein muß. Man bemerkt auch, daß der Durchmeſſer eines Ringes von irgend einer Ordnung um ſo kleiner iſt, je brech-

Digitized by Google

barer die Farbestrahlen sind, welche ihn erzeugen. Bringt man in den Raum zwischen beiden Gläsern einen Tropfen Flüssigkeit, wie Wasser, Weingeist, so bildet dieser gewissermaßen um den Berührungspunkt der Gläser concentrische Schichten, welche nach außen hin an Dicke zunehmen. Verschiedene durchsichtige Flüssigkeiten gewähren nun zwar im Ganzen dieselbe Erscheinung, welche mit der obigen übereinkommt, aber die Dicke der Schicht, welche einem bestimmten Ringe entspricht, ist nach der Natur der Flüssigkeit veränderlich. Newton fand, indem er die Durchmesser der Ringe für verschiedene Flüssigkeiten einer genauen Messung unterwarf, daß der Durchmesser eines Ringes unter sonst gleichen Umständen um so kleiner wird, jemehr das Brechungsvermögen der Flüssigkeit zunimmt.

Man kann die Newton'schen Farbenringe auch bequem hervorbringen, wenn man zwei ebene Glasplatten, von denen die eine ringsum einen Zoll breit vergoldet ist, in der Mitte zusammendrückt. Will man die Erscheinung an Seifenblasen beobachten, so löse man nach Böttger die Seife in einer Phiole vermittelst destillirten Wassers auf, indem man das Gefäß über einer Weingeistlampe erwärmt. Bei der Temperatur des Siedpunktes verschließt man das Glas sorgfältig und läßt es erkalten. Wenn man dann das Glas schüttelt, so entstehen dünne Seifenblasen, an denen sich die Farbenringe sehr schön zeigen.

59. Die Newton'schen Farbenringe können nun, wie die Beugungserscheinungen, durch die Interferenz des Lichts vollständig erklärt werden. Es falle in der Richtung ab ein Lichtbündel auf ein dünnes, durchsichtiges Plättchen mn. Dann werden die Strahlen theils in der Richtung be reflectirt, theils nach bg gebrochen. Während nun an der zweiten Fläche des Mittels ein Theil der gebrochenen Strahlen in der Richtung gk fortgeht, wird ein anderer Theil von g nach d reflectirt, wo er parallel mit be, nämlich in der Richtung df austritt. Ein zweites mit dem vorigen paralleles Strahlenbündel cd wird ebenso theils unmittelbar in der Richtung df reflectirt, theils nach dh gebrochen, u. s. w. Man sieht also, daß sich in der Richtung df zwei Strahlenbündel fortpflanzen, welche verschiedene Wege zurückgelegt haben und daher zur Interferenz gelangen müssen. Das eine von ab herrührende Strahlenbündel hat den Weg bgd zurück-



Digitized by Google

gelegt, wenn es bei d aus dem Plättchen heraustritt, während das andere von cd kommende Strahlenbündel unmittelbar von der oberen Fläche des Mittels nach df reflectirt wurde. Ist nun die Dicke des Plättchens oder der Weg bg gleich $^1/_2$ Wellenlänge, so beträgt der Gangunterschied der erwähnten Strahlenbündel, da auch gd gleich $^1/_2$ Wellenlänge ist, eine ganze Wellenlänge. Daher befinden sich die Strahlen beider Bündel in gleichen Schwingungszuständen, sie müssen sich gegenseitig unterstützen und im Plättchen eine helle Stelle hervorbringen. Das Gegentheil würde bekanntlich geschehen, wenn der Gangunterschied bgd $^1/_2$ Wellenlänge oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge ausmachte.

Denken wir uns nun eine Schicht, welche von einem Punkte aus gleichförmig an Dicke zunimmt, wie die früher erwähnte Luftschicht zwischen einer Linse und einem Planglase, so wird an der Berührungsstelle beider Gläser, wo die Dicke der Schicht so gering ist, daß sich der Gangunterschied beider Strahlenbündel als verschwindend klein betrachten läßt, ein heller Fleck entstehen müssen. Etwas weiter hin, wo die Dicke der Schicht $^1/_4$ Wellenlänge beträgt, wo also der Gangunterschied der Strahlenbündel bgd $= ^1/_4 + ^1/_4 = ^1/_2$ Wellenlänge ist, wird wegen des entgegengesetzten Schwingungszustandes der Strahlen ein dunkeler Ring zum Vorschein kommen. Ein zweiter dunkeler Ring wird da entstehen, wo die Dicke der Schicht $^3/_4$ Wellenlänge beträgt, wo mithin der Gangunterschied der Strahlenbündel gleich $^3/_4 + ^3/_4 = ^3/_2$ Wellenlängen ist. So müssen an allen Stellen, wo der Gangunterschied der Strahlen ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge beträgt, dunkele Ringe entstehen, während die zwischenliegenden hellen Ringe sich da bilden, wo die Dicke der Schicht 1, 2, 3, 4, 5, ... halbe Wellenlängen, wenn also der Gangunterschied der Strahlenbündel 1, 2, 3, 4, 5, .. ganze Wellenlängen beträgt.

Indessen besteht zwischen unseren Strahlenbündeln noch ein anderer Unterschied als derjenige, welcher in der ungleichen Länge der Wege seinen Grund hat. Es ist nämlich zu bedenken, daß es nicht einerlei sein kann, ob eine Lichtwelle an der äußeren oder inneren Grenzfläche eines durchsichtigen Mediums reflectirt wird. In unserem Falle, wo eine dünne Luftschicht zwischen zwei Glasflächen enthalten ist, wird das eine Strahlenbündel in Glas, das andere in Luft, d. h. in einem Mittel, das eine viel geringere Dichtigkeit als jenes besitzt, reflectirt. Das letztere Strahlenbündel erleidet nun bei der Reflexion an der unteren Glasfläche eine Verzögerung, welche dem Verluste einer

Digitized by Google

halben Wellenlänge gleich zu achten ist. Young sucht dies durch die Wirkung zweier elastischer Kugeln zu erläutern. Stößt nämlich eine bewegte elastische Kugel an eine andere ruhende von gleicher Größe, so empfängt bekanntlich die zweite die Geschwindigkeit der ersten und diese gelangt zur Ruhe. Aehnliches nun findet statt, wenn sich der Schall oder das Licht in einem gleichförmig elastischen Mittel fortpflanzt; die Schwingung irgend eines Theilchens überträgt sich auf das nächstfolgende und das vorige kommt in Ruhe. Stößt aber eine elastische Kugel an eine größere, ruhende, so wird sie zurückgeworfen, mit einer Geschwindigkeit, welche der vorigen gleich, aber entgegengesetzt ist. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich, wenn die Schwingung aus einem dünneren in ein dichteres Mittel übergeht. Ist dagegen die ruhende Kugel kleiner als die anstoßende, so bewegt sich letztere in der anfänglichen Richtung fort. Aehnliches kommt vor, wenn die Schwingung aus einem dichteren in ein dünneres Mittel übergehen soll, indem das schwingende Theilchen noch ein wenig in das dünnere Mittel eindringt und erst beim Rückgange die reflectirte Welle hervorbringt, womit dann der Verlust einer halben Wellenlänge zusammenhängt.

Beträgt demnach die Verzögerung des an der unteren Grenzfläche reflectirten Bündels $^1/_2$ Wellenlänge, so wird da ein heller Ring entstehen müssen, wo im obigen Falle, bei dem nur der Unterschied der Wege in Betracht kam, ein dunkeler Ring entstand. Weil die Luftschicht im Berührungspunkte beider Gläser außerordentlich dünn ist, so kann auch hier zwischen den Wegen der Strahlenbündel kein merklicher Unterschied stattfinden. Es müßte also hier, wie oben erwähnt, ein heller Fleck entstehen, wenn nicht das von der unteren Fläche reflectirte Bündel gegen das andere um $^1/_2$ Wellenlänge verzögert würde. Um dieses Umstandes willen befinden sich die Strahlen beider Bündel in entgegengesetzten Schwingungszuständen, wodurch an der Berührungsstelle der Gläser ein dunkeler Fleck entsteht, wie die Erfahrung zeigt. Da, wo die Dicke der Schicht $^1/_2$ Wellenlänge beträgt, ist der Gangunterschied gleich 1 Wellenlänge, wozu noch der Verlust einer halben Wellenlänge bei der Reflexion von der unteren Glasfläche gerechnet werden muß. Die beiden Strahlenbündel müssen also so auf einander wirken, als ob ihr Gangunterschied gleich $1 + {}^1/_2 = {}^3/_2$ Wellenlängen wäre. Es wird demnach hier der erste dunkele Ring entstehen. An der Stelle, wo die Dicke der Schicht $^2/_2$ Wellenlängen beträgt, ist der bloße Unterschied der Wege gleich $^2/_2 + {}^2/_2 = {}^4/_2$ Wellenlängen, also der ganze Gangunterschied der

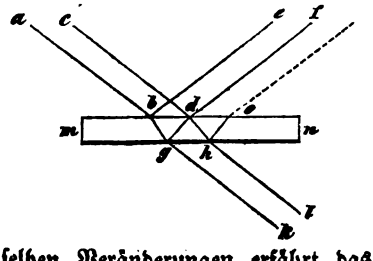
Digitized by Google

Strahlenbündel $^1/_2 + {}^1/_2 = {}^5/_2$ Wellenlängen. Mithin wird auch hier ein dunkeler Ring erzeugt. Auf diese Weise geht es fort, so daß überall, wo die bloße Differenz der Wege 2, 4, 6, 8, ... halbe Wellenlängen beträgt, dunkele Ringe entstehen müssen. Denn das Hinzufügen der halben Wellenlänge, um welche das von der unteren Fläche des Mittels reflectirte Strahlenbündel verzögert wird, macht den gesammten Gangunterschied beider Strahlenbündel zu einem ungeraden Vielfachen einer halben Wellenlänge, wodurch ein entgegengesetzter Schwingungszustand beider Strahlenbündel herbeigeführt wird. Die letzteren müssen sich also an allen solchen Stellen gegenseitig aufheben.

Der erste helle Ring entsteht da, wo die Dicke der Schicht $^1/_4$ Wellenlänge beträgt. Die Differenz der Wege beider Strahlenbündel ist demnach hier gleich $^1/_4 + {}^1/_4 = {}^1/_2$ Wellenlänge, und da auch hier das von der unteren Fläche reflectirte Bündel eine Verzögerung von einer halben Wellenlänge erfährt, so ist der ganze Gangunterschied beider Bündel $^1/_2 + {}^1/_2 = 1$ Wellenlänge. Die Strahlen beider Bündel befinden sich also in demselben Schwingungszustande, sie werden sich deshalb gegenseitig unterstützen und zusammen einen hellen Ring hervorbringen. Ist die Dicke der Schicht gleich $^3/_4$ Wellenlänge, so ist die Differenz der Wege $^3/_4 + {}^3/_4 = {}^3/_2$ Wellenlängen und der gesammte Gangunterschied gleich $^3/_2 + {}^1/_2 = 2$ Wellenlängen. An dieser Stelle wird sich mithin ein zweiter heller Ring bilden. Weiterhin entstehen helle Ringe an solchen Stellen, wo die Dicke der Schicht $^5/_4$, $^7/_4$, .. Wellenlängen beträgt.

Dünne Schichten durchsichtiger Körper zeigen auch im durchgelassenen Lichte Farben, welche complementär zu denen sind, die man an denselben Stellen im reflectirten Lichte sieht.

Das Lichtbündel ab wird theils nach be reflectirt, theils nach bg gebrochen, ebenso bg theilweise nach gd reflectirt, theils nach gk gebrochen. Während nun ein Theil von gd bei d in der Richtung df austritt, wird ein anderer Theil von der inneren Fläche des Mittels von d nach h reflectirt, wo er das Mittel in der Richtung hl verläßt. Dieselben Veränderungen erfährt das Lichtbündel cd, indem es theils nach df zurückgeworfen, theils nach dh gebrochen wird; dh wird wieder zum Theil in der Richtung hl durchgelassen, zum Theil nach



Digitized by Google

h o u. ſ. w. reflectirt. Es treten alſo bei h zwei Strahlenbündel aus, von denen das eine die Wege b g, g d, d h, das andere aber nur den Weg d h zurückgelegt hat; beide müſſen ſich alſo je nach der Differenz dieſer Wege gegenſeitig unterſtützen oder vernichten, wobei noch der Verluſt einer halben Wellenlänge bei jeder Reflexion von der inneren Fläche des Mittels in Anſchlag zu bringen iſt. So erleidet das von a b herkommende Strahlenbündel wegen der zweimaligen inneren Reflexion bei g und d noch eine Verzögerung von einer ganzen Wellenlänge, ſo daß es bei h in demſelben Schwingungszuſtande austritt, als ob es den Weg b g + g d + d h + l gemacht hätte, wenn man nämlich durch l die Länge einer Welle bezeichnet.

Betrachten wir nun wieder eine Schicht, welche von einem Punkte aus ringsum an Dicke gleichförmig zunimmt. Da, wo die Schicht verſchwindend klein iſt, hat man (ſ. obige Figur) b g — g d — d h — o, ſo daß für den Unterſchied beider Strahlenbündel nur noch 1 Wellenlänge wegen der Reflexion übrig bleibt. Beide Bündel werden ſich alſo verſtärken, ſo daß in der Mitte der Schicht ein heller Fleck entſtehen muß. An der Stelle, wo die Dicke der Schicht $^1/_4$ Wellenlänge beträgt, iſt b g — g d — d h — $^1/_4$ l, alſo der Weg des einen Bündels gleich $^1/_4$ l + $^1/_4$ l + $^1/_4$ l + l — $^7/_4$ l, und der des anderen — $^1/_4$ l. Demnach der Gangunterſchied beider Bündel gleich $^7/_4$ — $^1/_4$ — $^3/_2$ Wellenlängen; ſie befinden ſich alſo in entgegengeſetzten Schwingungszuſtänden und müſſen ſich aufheben. An dieſer Stelle entſteht der erſte dunkele Ring für durchgelaſſenes Licht. Der zweite, dritte, vierte, ... dunkele Ring bildet ſich da, wo die Dicke der Schicht $^3/_4$, $^5/_4$, $^7/_4$, .. Wellenlängen beträgt, wovon man ſich auf die vorige Weiſe ſehr leicht überzeugen kann. Mithin fallen im durchgelaſſenen Lichte die dunkelen Ringe an diejenigen Stellen, welche für reflectirtes Licht hell ſind.

Beträgt die Dicke der Schicht $^1/_2$ Wellenlänge, ſo iſt der Weg des von a b herkommenden und bei h austretenden Strahlenbündels, da b g — g d — d h — $\frac{1}{2}$, gleich $^1/_2$ l + $^1/_2$ l + $^1/_2$ l + l, nämlich gleich $^5/_2$ l, während der des anderen gleich $\frac{1}{2}$ iſt; alſo der Gangunterſchied beider Bündel gleich $^4/_2$ l — 2 l, d. h. gleich 2 Wellenlängen. Beide Strahlenbündel verſtärken ſich und bringen einen hellen Ring hervor. Ein zweiter, dritter, .. heller Ring bildet ſich, wo die Dicke der Schicht $^2/_2$, $^3/_2$, ... Wellenlängen beträgt. Die

Digitized by Google

hellen Ringe fallen also bei durchgelassenem Lichte dahin, wo für reflectirtes die dunkelen waren, was ebenfalls, wie wir schon wissen, mit der Erfahrung übereinstimmt.

Läßt man die bisher besprochenen Erscheinungen nach einander für verschiedene homogene Lichtstrahlen entstehen, so bemerkt man, daß die Ringe um so schmäler werden und einander um so näher rücken, je kürzer die Wellenlänge dieser Strahlen ist. In demselben Verhältnisse nimmt auch die Schicht, welche einem bestimmten Ringe entspricht, für verschiedene Farben an Dicke ab. Die hellen und dunkelen Ringe können demnach für verschiedenfarbige Lichtstrahlen nicht zusammenfallen, daher die Farbenerscheinung bei weißem Lichte, indem bei diesem so viele Ringsysteme entstehen müssen, als es Farben enthält. Uebrigens sind die Farben für durchgelassenes Licht minder lebhaft als für reflectirtes, weil bei letzterem die Intensität der zur Interferenz gelangenden Strahlenbündel weniger ungleich als bei ersterem ist, wo das eine Strahlenbündel eine zweimalige innere Reflexion erlitten hat. —

Kennt man den Durchmesser der Linse, welche bei Erzeugung der Newton'schen Ringe eine Glastafel berührt, so läßt sich, da man den Durchmesser eines Ringes mit großer Genauigkeit messen kann, auch die Dicke der Schicht messen, welche einem bestimmten Ringe entspricht. Aus der Dicke der Schicht ergiebt sich aber die Wellenlänge für eine bestimmte Farbe, da diese Dicke beim ersten dunkelen Ringe für reflectirtes Licht eine halbe und beim zweiten eine ganze Wellenlänge betragen muß. Die auf diese Weise erhaltenen Resultate stimmen mit den bei Gelegenheit der Beugungserscheinungen erhaltenen genau überein.

60. Aus den vorstehenden Betrachtungen folgt von selbst, wie wesentlich die Dünne der Schicht für die Erzeugung der Farben ist, da nur unter dieser Bedingung ein den Lichtwellen entsprechender Gangunterschied der Strahlen entstehen kann. Indessen zeigen auch dicke Platten unter gewissen Umständen Farbenerscheinungen, welche in der Interferenz mehrmals reflectirter und mehrmals gebrochener Strahlenbündel ihren Grund haben.

Man lasse Sonnenstrahlen durch eine etwa 4 Millimeter weite, runde Oeffnung in ein dunkeles Zimmer dringen und fange sie auf einem hinten belegten Hohlspiegel von Glas auf. Der Spiegel hat dabei eine solche Stellung, daß seine Axe mit der Richtung der einfallenden Strahlen übereinkommt. Um die Oeffnung herum beobachtet man dann auf einem Schirme, welcher mit weißem Papier überzogen

Digitized by Google

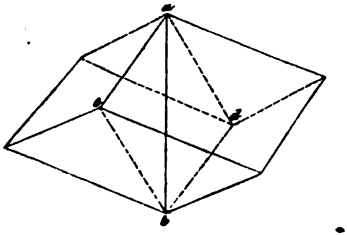
ist, eine Reihe schöner Farbenringe. Diese erscheinen am lebhaftesten, wenn die Entfernung des Schirmes vom Spiegel dem Krümmungshalbmesser des letzteren gleich ist. Die Farben der Ringe folgen in der Ordnung auf einander, wie die Farben dünner Plättchen. Die Lebhaftigkeit der Farben läßt sich noch erhöhen, wenn man die spiegelnde Fläche etwas matt macht, was entweder dadurch geschehen kann, daß man darauf haucht oder dadurch, daß man sie mit feinem Mehle oder dergleichen bestreut.

Bei Anwendung von homogenem Lichte erscheinen die Ringe abwechselnd hell und dunkel und nehmen nach außen, wie bei dünnen Plättchen, allmälig an Breite und Intensität ab. Auch diese Erscheinung beruht ganz auf der Interferenz des Lichts, indem die Strahlen, welche vom Hohlspiegel auf verschiedenen Wegen zu einem Punkte des Schirmes gelangen, sich je nach der Differenz dieser Wege bald verstärken, bald schwächen.

Achtes Kapitel.

Von der doppelten Brechung des Lichtes.

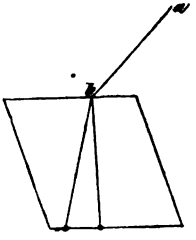
61. Wenn ein Lichtstrahl unter irgend einem Winkel auf einen Krystall fällt, welcher nicht zum regulären Systeme gehört, so wird er in der Regel in zwei Strahlen zerlegt, die den Krystall in verschiedenen Richtungen durchlaufen. Diese Erscheinung wurde zuerst von Bartholin am krystallisirten kohlensauren Kalk oder an dem sogenannten isländischen Doppelspath beobachtet, der überhaupt zur Darstellung der Erscheinung besonders geeignet ist. Der Kalkspath ist nach drei Richtungen vollkommen spaltbar, so daß man durch's Spalten seiner Blätterdurchgänge ein Rhomboeder erhält, das seine Kerngestalt ist. Die beiden einander gegenüberliegenden Ecken a und b werden von drei gleichen, stumpfen Winkeln gebildet, deren Ebenen eine gleiche Neigung zu einander haben, während an den übrigen Ecken zwei gleiche spitze und ein stumpfer Winkel zusammenstoßen. Verbindet man die stumpfen Ecken a und b durch eine gerade Linie, so ist diese die Hauptaxe des Krystalls, welche mit den Kanten der stumpfen Ecken gleiche Winkel macht. Eine solche



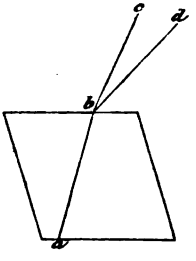
Digitized by Google

Axe kommt jedem Punkte des Kalkſpathes zu, da man ſich den letzteren aus lauter der Kerngeſtalt ähnlichen Maſſetheilchen zuſammengeſetzt denken kann. Alle dieſe Axen ſind mit einander parallel. Eine durch die Hauptaxe und zwei parallele Kanten gelegte Ebene acbd nennt man einen Hauptſchnitt des Kryſtalls.

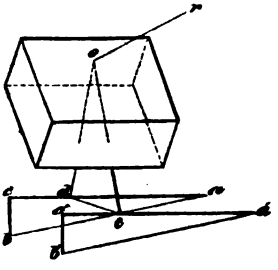
Durch einen Kalkſpath ſieht man einen Gegenſtand beinahe in allen Lagen doppelt. Legt man auf die Fläche eines Kalkſpathrhomboeders ein Kartenblatt mit einem kleinen Loche und läßt man dann durch dieſes einen Sonnenſtrahl auf den Kryſtall fallen, ſo bemerkt man an der gegenüberliegenden Fläche, wenn dieſelbe mit einem etwas durchſichtigen Papierblatte bedeckt iſt, zwei helle Punkte. Der Strahl ab erleidet alſo im Kryſtall eine doppelte Brechung.



Legt man auf ein weißes Papierblatt, welches mit einem ſchwarzen Punkte verſehen iſt, ein Kalkſpathrhomboeder und auf die obere Fläche des letzteren ein Blatt mit einer kleinen Oeffnung, ſo ſieht man durch dieſe den Punkt a nach zwei unveränderlichen Richtungen bc und bd. Man muß hieraus ſchließen, daß ſich in der Richtung ab zwei Strahlen fortpflanzen, die den Kryſtall im Punkte b nach verſchiedenen Richtungen verlaſſen.



Um die Geſetze der doppelten Brechung oder die Lage der beiden gebrochenen Strahlen gegen einander zu ermitteln, hat man ein einfaches Verfahren von Malus. Auf ein weißes Papier verzeichne man ein rechtwinkliges Dreieck, deſſen Seite ac viel größer als bc iſt, und theile die Seiten ac und ab in eine gewiſſe Anzahl gleicher Theile. Durch den Kalkſpath betrachtet erſcheint nun das Dreieck abc doppelt und beide Bilder werden ſich in einem beſtimmten Punkte e ſcheiden. Iſt nun ad = a'e, ſo iſt od der eine und oe der andere von den beiden gebrochenen Strahlen, welche ſich im Punkte o zu dem Lichtſtrahle op zuſammenſetzen. Aus der Theilung erfährt man den Werth von de, und, wenn der Punkt o bezeichnet iſt, kennt man auch die Linien do und eo. Aus dem Dreiecke



Digitized by Google

doe ergiebt sich dann auch der Winkel doe, welchen die gebrochenen Strahlen mit einander machen.

62. Schleift man aus einem Kalkspathrhomboeder ein Prisma, so erblickt man durch dasselbe von einem und demselben Gegenstande zwei Bilder. Der Abstand der letzteren ist um so geringer, je kleiner der brechende Winkel des Prisma's ist, und hängt überdies noch von der Richtung ab, in welcher die Strahlen den Krystall durchlaufen. Wenn die brechende Kante des Kalkspathprisma's mit seiner Hauptaxe parallel ist, so bewegen sich beide gebrochene Strahlen in Richtungen durch das Prisma, welche auf der genannten Axe senkrecht stehen. Untersucht man nun auf bekannte Weise die Brechungsexponenten dieser Strahlen, so findet man für denjenigen, welcher die stärkste Ablenkung erlitten hat, die Zahl 1,654, für den anderen aber den Werth 1,483. Hat die brechende Kante des Prisma's eine andere Lage gegen die Hauptaxe als die erwähnte, so sind die Richtungen der beiden gebrochenen Strahlen nicht mehr senkrecht zur Hauptaxe. Eine neue Bestimmung der Brechungsexponenten beider Strahlen ergiebt dann für den am stärksten gebrochenen Strahl wieder den Werth 1,654, während sich für den anderen eine von 1,483 verschiedene Zahl herausstellt, die überhaupt mit der Richtung, in welcher dieser Strahl den Krystall durchläuft, veränderlich ist. Der erste Strahl richtet sich also ganz nach dem gewöhnlichen Brechungsgesetze, da das Verhältniß zwischen dem Sinus des Einfallswinkels und dem Sinus des Brechungswinkels bei ihm immer gleich 1,654 ist. Aus diesem Grunde nennt man ihn auch den gewöhnlichen oder ordentlichen Strahl. Dagegen ist der andere Strahl dem gewöhnlichen Brechungsgesetze nicht unterworfen, das Verhältniß zwischen jenen Sinus ist bei ihm je nach der Richtung veränderlich; man nennt ihn deshalb auch den ungewöhnlichen, außerordentlichen Strahl.

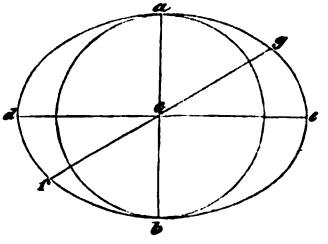
63. Nach der Undulationstheorie pflanzen sich die Lichtwellen in einem stärker brechenden Mittel langsamer als in einem schwächer brechenden fort. Die ungleiche Brechung der beiden im Kalkspath sich fortpflanzenden Strahlen ist aber nur eine Folge ihrer verschiedenen Geschwindigkeiten. Für den stärker gebrochenen, ordentlichen Strahl ist also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Krystall geringer als für den anderen, außerordentlichen Strahl. Da ferner der Brechungsexponent der gewöhnlichen Strahlen immer derselbe ist, so müssen sich diese Strahlen nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit durch den Krystall bewegen, während die außerordentlichen Strahlen nach verschiedenen Richtungen eine verschiedene Geschwin-

Digitized by Google

digkeit haben müſſen, inſofern ihr Brechungsexponent ſich mit der Richtung ändert. Wenn ſich daher von einem Punkte aus gewöhnlich gebrochene Strahlen nach allen Richtungen im Kalkſpathe ausbreiten, ſo wird die Oberfläche der Lichtwellen wie in einem einfach brechenden Mittel von gleichförmiger Dichte kugelförmig ſein; dagegen iſt für die außerordentlichen Strahlen wegen ihrer mit der Richtung veränderlichen Fortpflanzungsgeſchwindigkeit eine ſolche Wellenoberfläche unmöglich.

64. Wir haben oben geſehen, daß der Brechungsexponent der außerordentlichen Strahlen gleich 1,483 iſt, wenn ſie in einer Richtung durch den Kryſtall gehen, welche auf der Hauptaxe deſſelben rechtwinklig iſt. In dieſem Falle iſt der Brechungsexponent am kleinſten und die außerordentlichen Strahlen bewegen ſich mit der größten Geſchwindigkeit durch den Kryſtall. Je mehr die Richtung der außerordentlichen Strahlen der Richtung der Hauptaxe des Kryſtalls nahe kommt, deſto ſtärker werden ſie gebrochen und deſto geringer iſt ihre Fortpflanzungsgeſchwindigkeit. Sobald aber die Richtung mit der optiſchen Axe zuſammenfällt, pflanzen ſich alle Strahlen mit gleicher Geſchwindigkeit fort, indem allen der Brechungsexponent 1,654 zukommt, d. h. Strahlen, welche in der Richtung der optiſchen Axe (Hauptaxe) den Kryſtall durchlaufen, werden gar nicht gebrochen.

Stellt nun a b die Richtung der optiſchen Axe des Kalkſpathes, c a — c b die Geſchwindigkeit der ordentlich gebrochenen, c d — c e die Geſchwindigkeit der außerordentlich gebrochenen Strahlen dar, ſo drückt die Ellipſe a d b e das Geſetz aus, nach welchem ſich die Geſchwindigkeit der außerordentlichen Strahlen im Kryſtall mit ihrer Richtung ändert. In der Richtung der optiſchen Axe a b ſelbſt iſt die Geſchwindigkeit der ordentlichen und außerordentlichen dieſelbe, beide haben den Brechungsexponenten 1,654, ſo daß alſo in dieſem Falle keine doppelte Brechung des einfallenden Lichtes ſtattfindet. Für irgend eine andere Richtung, welche mit der Axe a b einen beſtimmten Winkel einſchließt, ergiebt ſich die Geſchwindigkeit der außerordentlichen Strahlen, wenn man ſich unter dieſem Winkel vom Mittelpunkte c der Ellipſe die Linie c g gezogen denkt. Die Länge des Leitſtrahles c g bezeichnet die Geſchwindigkeit des außerordentlichen Strahles in dieſer Richtung. Den größten Werth erlangt die Geſchwindigkeit des außerordentlichen Strahles, wenn dieſer mit der optiſchen Axe a b

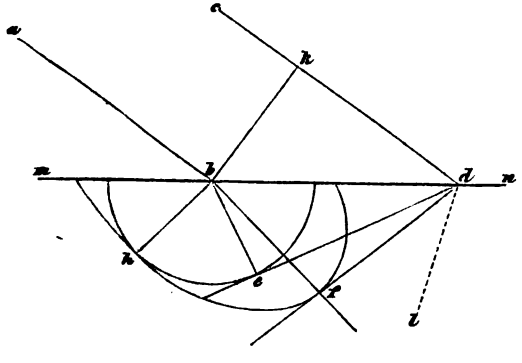


Digitized by Google

einen rechten Winkel macht; der Lichtstrahl ist dann gleich der halben großen Axe der Ellipse. Die Geschwindigkeit der ordentlichen Strahlen ist nach allen Richtungen dieselbe, so daß sie sich durch den Radius eines Kreises ausdrücken läßt, welcher um c mit dem Halbmesser c a beschrieben ist. Denkt man sich nun die ganze Figur um die Axe a b gedreht, so geht aus der Umdrehung des Kreises eine Kugel und aus der Umdrehung der Ellipse ein Ellipsoid hervor; jene entspricht der Wellenoberfläche der gewöhnlichen, dieses der Wellenoberfläche der außerordentlichen Strahlen.

Fällt daher auf die Fläche eines Kalkspathes eine Reihe von Aetherwellen, so verbreiten sich von jedem Punkte dieser Fläche sowohl kugelförmige als ellipsoidische Wellen in das Innere des Krystalls. Jene bilden das gewöhnlich gebrochene, diese das ungewöhnlich gebrochene Licht.

Die Richtung der beiden gebrochenen Strahlen läßt sich nach Huyghens durch eine einfache Construction bestimmen. Die Oberfläche des Krystalls sei m n und a b die Richtung eines einfallenden Lichtstrahles. Zunächst ergiebt sich die Richtung des gewöhnlich gebrochenen Strahles auf eine Weise, die wir schon bei der einfachen Brechung kennen gelernt haben. Man ziehe c d parallel zu a b und b k senkrecht auf c d. Nun ist der Brechungsexponent des gewöhnlichen Strahles gleich 1,654 und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieses Strahles verhält sich zur Geschwindigkeit des Lichts in der Luft wie 1 : 1,654. Beschreibt man daher um b einen Kreis, dessen Halbmesser zu der Linie d k in dem eben angegebenen Verhältnisse steht, und zieht man von d aus an diesen Kreis eine Tangente, so stellt die von b nach dem Berührungspunkte gezogene Linie b e die Richtung des gebrochenen Strahles vor. Alsdann construire man auch um den Mittelpunkt b eine Ellipse, deren kleine Halbaxe b h sich zu d k gleichfalls wie 1 : 1,654 verhält, während die auf b h senkrechte große Halbaxe mit d k das Verhältniß 1 : 1,483 bildet. Zieht man jetzt vom Punkte d eine Tangente an



Digitized by Google

die Ellipse, so ist die von b zum Berührungspunkte gezogene Linie b f die Richtung des außerordentlich gebrochenen Strahles. Wenn die Einfallsebene des Strahles nicht mit der Ebene des Hauptschnittes, in welcher die optische Axe b h liegt, übereinkommt, so tritt der außerordentliche Strahl aus der Ebene des Hauptschnittes oder hier aus der Ebene des Papiers heraus. Dreht sich die Ellipse um die Axe b h (s. obige Figur), so entsteht die ellipsoidische Wellenoberfläche des ungewöhnlich gebrochenen Strahles. Denkt man sich dann in d auf die Ebene des Papiers, also auf die Einfallsebene des Strahles, eine Senkrechte d l gezogen und durch diese eine berührende Ebene an die ellipsoidische Wellenoberfläche gelegt, so stellt die von b nach dem Berührungspunkte der Ebene und des Ellipsoides gezogene Gerade die Richtung des ungewöhnlich gebrochenen Strahles in diesem Falle dar.

65. Die Ursache, warum des einfallende Licht im Kalkspath in zwei Strahlen gespalten wird, welche ihn mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen, liegt darin, daß die Elasticität des Aethers in diesem Krystalle nach verschiedenen Richtungen ungleich ist. Die Elasticität des Kalkspathes selbst ist nach verschiedenen Richtungen eine andere und daher auch die des Aethers, dessen Elemente sich um die Massetheilchen des Spathes gruppirt haben. Da aber die Anordnung der Massetheilchen dieses Krystalls in Beziehung auf seine Hauptaxe symmetrisch ist, so muß auch die Elasticität des Aethers nach allen auf dieser Axe senkrechten Richtungen dieselbe sein. Es läßt sich nun hieraus leicht die ungleiche Geschwindigkeit der beiden auf verschiedene Weise im Kalkspathe gebrochenen Strahlen erklären, wenn man annimmt, daß die Aethertheilchen, welche den ordentlichen Strahl fortpflanzen, senkrecht zur optischen Axe schwingen, während die Schwingungen des außerordentlichen Strahles in der Ebene des Hauptschnittes stattfinden. Es folgt dann, daß jener Strahl sich nach allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit durch den Krystall fortpflanzen muß, da die Elasticität des Aethers senkrecht zur optischen Axe überall dieselbe ist, daß aber die Geschwindigkeit der außerordentlichen Strahlen von der Richtung abhängt, in der sie den Krystall durchlaufen. Bewegt sich z. B. der außerordentliche Strahl senkrecht zur optischen Axe durch den Krystall, so geschehen seine Schwingungen parallel mit der optischen Axe, während die des gewöhnlichen Strahles senkrecht zu dieser Axe vor sich gehen. In diesem Falle findet zwischen den Geschwindigkeiten beider Strahlen der größte Unterschied statt. Dagegen ist die Geschwindigkeit der außerordentlichen Strahlen um so weniger von der Geschwindigkeit der ordentlichen verschieden, je

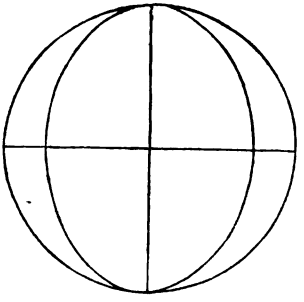
Digitized by Google

mehr sich ihre Richtung der optischen Axe nähert, weil dann auch der Winkel, den die Schwingungen dieser Strahlen mit jener Axe machen, einem rechten um so näher kommt. Bewegen sich endlich die außerordentlichen Strahlen in der Richtung der optischen Axe selbst durch den Krystall, so gehen ihre Schwingungen gleich denen der ordentlichen Strahlen senkrecht zur optischen Axe vor sich, und da die Elasticität des Aethers senkrecht zur genannten Axe gleichförmig ist, so müssen sich alle Strahlen, die außerordentlichen wie die ordentlichen, in dieser Richtung mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen, oder mit anderen Worten, es findet in diesem Falle keine doppelte Brechung statt.

Im Kalkspathe werden die ordentlichen Strahlen stärker als die außerordentlichen gebrochen, was sich daraus erklärt, daß die Elasticität des Aethers in der Richtung der Hauptaxe größer ist als in allen anderen Richtungen, während die Elasticität des Aethers am kleinsten ist für alle Richtungen, welche auf der Hauptaxe senkrecht sind. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtstrahlen hängt nun allein von der Elasticität des Aethers in der Richtung ab, nach welcher die Schwingungen vor sich gehen. Da aber die Schwingungen der ordentlichen Strahlen senkrecht zur optischen Axe des Krystalls geschehen, so müssen sich diese Strahlen langsamer fortpflanzen als die außerordentlichen, deren Schwingungen parallel mit der optischen Axe stattfinden. Je langsamer aber ein Strahl sich fortpflanzt, desto stärker wird er gebrochen. Daher ist auch im Kalkspathe für den gewöhnlichen Strahl die Brechung stärker als für den ungewöhnlichen. Wegen der größeren Fortpflanzungsgeschwindigkeit des letzteren hüllt die ellipsoidische Wellenoberfläche die kugelförmige der gewöhnlichen Strahlen ganz ein und das Ellipsoid entsteht hier (s. Fig. auf S. 332) durch Umdrehung der Ellipse um die kleinere Axe.

Wie im Kalkspathe, so geschieht auch die doppelte Brechung in allen Krystallen, die zum rhomboedrischen oder pyramidalen Systeme gehören, jedoch mit dem Unterschiede, daß in einigen der gewöhnliche, in anderen der ungewöhnliche Strahl stärker gebrochen wird. Solche Krystalle, für welche, wie beim Kalkspathe, der Brechungsexponent des gewöhnlichen Strahles größer ist als derjenige des ungewöhnlichen, nennt man *negative* oder *abstoßende* Krystalle, weil der letzterwähnte Strahl gleichsam von der optischen Axe hinweggetrieben wird. Dagegen heißen jene Krystalle, in denen der ungewöhnliche Strahl eine stärkere Brechung als der gewöhnliche erleidet, *positive* oder *anziehende* Krystalle, weil der erstere Strahl scheinbar von der Axe angezogen wird. Bei ihnen entsteht die Wellenoberfläche der unge-

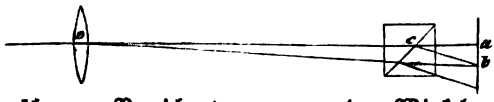
Digitized by Google



wöhnlichen Strahlen durch Umdrehung der Ellipse um ihre große Axe, so daß das Ellipsoid von der kugelförmigen Wellenoberfläche der ordentlichen Strahlen ganz eingehüllt wird.

66. Unter mnp und pqm denke man sich zwei dreiseitige Prismen aus Kalkspath, welche in mp zusammengekittet sind. Das erste Prisma ist so geschnitten, daß seine optische Axe auf der Fläche mn senkrecht steht; das zweite aber dergestalt, daß die optische Axe mit der Durchschnittskante q der Flächen mq und pq parallel ist, daß sie also auf der Ebene des Papiers senkrecht steht. Ein Lichtstrahl ab, welcher senkrecht zu mn einfällt, geht ungebrochen durch das erste Prisma hindurch, erleidet aber im zweiten eine doppelte Brechung in der Art, daß der ordentliche Strahl in gerader Richtung, der außerordentliche aber in der Richtung cde fortgeht. Ein anderer Lichtstrahl fg wird im zweiten Prisma auf ähnliche Weise nach den Richtungen ge und ghl gebrochen. Befindet sich nun das Auge in e, wo sich der gewöhnliche Theil des einen und der außerordentlich gebrochene Theil des anderen schneiden, so sieht es den Gegenstand, von dem die Strahlen kommen, nach den Richtungen edc und eg und nimmt mithin zwei Bilder desselben wahr. Je näher sich das Auge dem Prisma befindet, desto weiter stehen unter sonst gleichen Umständen die Bilder von einander ab; es läßt sich aber leicht eine solche Entfernung des Auges vom Prisma finden, für welche die Ränder der Bilder einander berühren. Ist der Gegenstand z. B. eine kreisförmige Scheibe, so sind die beiden Bilder, wenn sie sich gerade berühren, um den Durchmesser der Scheibe von einander entfernt. Man bemerkt leicht, wie man dieses Prisma, das zuerst von Rochon construirt wurde, zur Bestimmung des Durchmessers entfernter Gegenstände oder, falls der Durchmesser bekannt ist, zur Ermittelung der Entfernung des Gegenstandes benutzen kann; es wird daher bei Fernröhren als Mikrometer gebraucht, indem man es zwischen das Objectiv und das Ocular des Fernrohres bringt, aber so, daß es dem Objectiv beliebig genähert oder von demselben entfernt werden kann. In der nachstehenden Figur sieht man die Objectivlinse eines Fernrohres und das Rochon'sche Prisma in einer solchen Stellung,

Digitized by Google



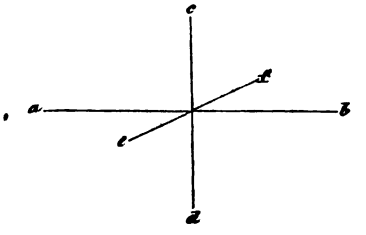
daß die beiden durch das Ocular betrachteten Bilder einander berühren. Bezeichnet man nun den Winkel, welchen die beiden gebrochenen Strahlen im Prisma mit einander machen, durch α, die Entfernung ac des Bildes vom Prisma durch d und die Brennweite bo des Objectivs durch p, so hat man bekanntlich $\frac{ab}{d} = \text{tang}\,\alpha$ und $\frac{ab}{p} = \text{tang}\,\beta$, wenn β der Winkel aob ist, unter dem der Gegenstand von der Mitte o des Objectivs aus erscheint. Durch Division beider Gleichungen erhält man $\frac{\text{tang}\,\beta}{\text{tang}\,\alpha} = \frac{d}{p}$ oder $\text{tang}\,\beta = \frac{d}{p}\,\text{tang}\,\alpha$. Aus letzterem Ausdrucke läßt sich also der Winkel β oder die scheinbare Größe des Gegenstandes berechnen, wenn die Größen d, p und α gegeben sind. Der Werth von α läßt sich aber leicht bestimmen, wenn man den brechenden Winkel des zweiten Prisma's und den Brechungsexponenten des ordentlichen und außerordentlichen Strahles kennt. Die Größe d oder die Entfernung des Prisma's vom Bilde kann man auf einer außerhalb des Fernrohres angebrachten Theilung ablesen.

67. Auch in Körpern, deren Krystallform zum prismatischen Systeme gehört, findet eine doppelte Brechung statt, aber keiner der beiden Strahlen, in welche sich der einfallende auflöst, folgt dem gewöhnlichen Brechungsgesetze. Für solche Krystalle giebt es also keinen gewöhnlich gebrochenen Strahl. Dagegen haben derartige Krystalle zwei optische Axen oder Linien, in denen keine doppelte Brechung vorkommt; man nennt sie deshalb auch im Gegensatze zu den rhomboedrischen und pyramidalen Körpern zweiaxige Krystalle. Der Winkel, welchen die beiden optischen Axen mit einander machen, ist in verschiedenen zu dieser Klasse gehörigen Körpern ungleich. Eine Linie, welche ihn halbirt, nennt man die Mittellinie; sie fällt mit einer der drei ungleichen krystallographischen Axen des Krystalls zusammen, während die Ebene, worin die beiden optischen Axen liegen, mit der Ebene der zwei anderen krystallographischen Axen übereinkommt.

In zweiaxigen Krystallen giebt es keine Richtung, um welche herum die Elasticität des Aethers gleichförmig ist, daher können sich auch in solchen Krystallen keine kugelförmigen Lichtwellen ausbreiten. Die Elasticität des Aethers ist hier nach drei auf ein-

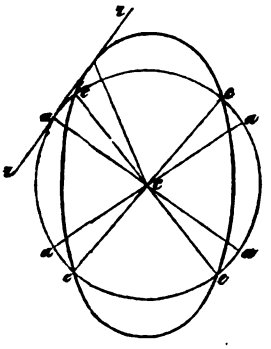
Digitized by Google

ander senkrechten Richtungen verschieden. Bezeichnet nun a b die Richtung, nach welcher die Elasticität des Aethers in einem zweiarigen Krystalle am größten ist, so ist sie in einer auf a b senkrechten Richtung c d am kleinsten, während dem Aether in der auf der Ebene dieser beiden Linien senkrechten Richtung e f eine mittlere Elasticität zukommen wird, d. h. sie ist hier kleiner als in der Richtung a b und größer als in der Richtung c d. Ein Ellipsoid nun, das die bezeichneten Linien zu Axen hat, stellt das Gesetz dar, nach welchem sich die Elasticität des Aethers mit der Richtung ändert. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Strahlen in irgend einer Richtung erhält man aber nach Fresnel, welcher die doppelte Brechung des Lichts in ein- und zweiarigen Krystallen durch die Undulationstheorie begründet hat, auf folgende Weise. Legt man durch den Mittelpunkt des Ellipsoides eine Ebene, so schneidet diese das Ellipsoid in einer Ellipse. Man errichte nun in der Mitte der Letzteren, und zwar senkrecht auf deren Ebene, eine gerade Linie und trage auf dieselbe die große und kleine Axe des elliptischen Schnittes auf. Alsdann geben die Längen der genannten Axen die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten der beiden gebrochenen Strahlen in der Richtung jener Senkrechten an.

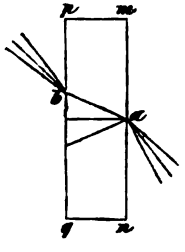


Die Wellenoberfläche der gebrochenen Strahlen ist hier aber kein Umdrehungsellipsoid, sondern eine aus zwei Abtheilungen zusammengesetzte Fläche von der Art, daß ihr Durchschnitt mit einer Ebene, welche durch je zwei der oben erwähnten Elasticitätsaxen geht, aus einem Kreise und einer Ellipse besteht. Die Schwingungen der Strahlen, welche den zweiarigen Krystall in irgend einer Richtung durchlaufen, können nun mit irgend einer der obigen Elasticitätsaxen parallel sein, und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit entspricht der Elasticität des Aethers in der Richtung der betreffenden Axe. Von besonderem Interesse ist der Durchschnitt der Wellenoberfläche mit einer Ebene, welche durch die Axen der größten und kleinsten Elasticität geht. Der Halbmesser des Kreises ist hier kleiner als die große und größer als die kleine Hauptaxe der Ellipse, so daß also der Kreis und die Ellipse sich in vier Punkten durchschneiden müssen. Zieht man an den Kreis und an die Ellipse eine gemeinschaftliche Tangente, so sind die durch den Mittelpunkt c gezogenen Linien a a die optischen Axen. Nach diesen

Digitized by Google



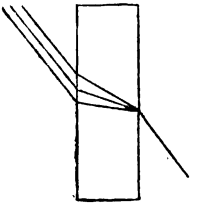
Richtungen pflanzen sich also alle Lichtwellen mit gleicher Geschwindigkeit fort. Die Linien ee, welche den wahren optischen Axen aa sehr nahe liegen, nennt man die scheinbaren optischen Axen, insofern sich in ihnen wohl alle Strahlen, nicht aber die gebrochenen Wellen selbst mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen. In der Nähe der vier Durchschnittspunkte der Ellipse und des Kreises zeigt die Wellenoberfläche trichterförmige Vertiefungen, welche von Hamilton genauer untersucht worden sind. Im Punkte e, der Spitze der Vertiefung, läßt sich nämlich an die Wellenoberfläche eine unendliche Anzahl von Berührungsebenen anlegen, von denen jede einem besonderen Strahle entspricht, so daß ein Strahl, welcher in der Richtung ce den Krystall durchläuft, sich beim Austritte in eine zahllose Menge von Strahlen auflöst, die zusammen in der Oberfläche eines Kegels liegen. Man nennt dies nach Hamilton die conische Brechung und zwar im Gegensatze zu einer anderen, aber ähnlichen, die äußere conische Brechung. Lloyd hat die Richtigkeit dieser theoretischen Folgerung Hamilton's durch den Versuch bestätigt. Er nahm eine Aragonitplatte, welche senkrecht zur Halbirungslinie der beiden optischen Axen geschliffen war, so daß die Richtungen ab und ac, in welchen sich die Strahlen mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen, einen Winkel von 80° mit der Oberfläche der Platte machten. Auf jede der Oberflächen mn und pq wurde nun eine dünne Metallplatte gelegt, in der sich eine sehr feine Oeffnung befand. Die Verbindungslinie beider Oeffnungen kam mit der Richtung ab überein. Brachte man dann der Platte von der einen Seite her eine Lampenflamme nahe, so fiel auf die Oeffnung a ein kegelförmiges Lichtbündel, welches, in der Richtung ab gebrochen, sich bei b in einen hohlen Strahlenkegel auflöste. Denn wenn man das Auge nach der Oeffnung b hin richtete, so sah man einen glänzenden Lichtring.



Legt man (s. d. Fig. oben) durch die Tangente tt, senkrecht auf die Ebene des Papiers, eine Berührungsebene an die Wellenoberfläche, so wird diese von jener in einer unendlichen Zahl von Punkten berührt, welche im Umringe eines Kreises liegen, dessen Ebene die

Digitized by Google

Mündung des Trichters verschließt. Daher entsprechen auch hier der gebrochenen Wellenfläche unzählige Strahlen, welche in der Oberfläche eines Kegels liegen, der jenen Kreis zur Basis hat. Fällt nun ein Lichtstrahl so auf die Oberfläche eines zweiaxigen Krystalls, daß der gebrochenen Welle gerade jene Berührungsebene entspricht, so wird er im Krystall in einen hohlen Strahlenkegel aufgelöst. Die einzelnen Strahlen desselben treten aber an der anderen Fläche, wenn diese parallel mit der Eintrittsfläche des Lichts ist, parallel unter einander und mit dem einfallenden Strahle aus, so daß sie einen hohlen Strahlencylinder bilden, dessen Basis dem Querschnitte des Kegels an der Austrittsfläche gleich ist. Hamilton nennt diese Brechung die innere conische, die Lloyd gleichfalls vermittelst eines senkrecht zu einer der beiden optischen Axen geschnittenen Aragonitkrystalles nachgewiesen hat.



68. Reguläre Krystalle, in denen die Elasticität des Aethers nach allen Richtungen dieselbe ist, zeigen keine doppelte Brechung. Doch können selbst Körper von gleichförmiger Dichtigkeit die Eigenschaft, das Licht doppelt zu brechen, erhalten, wenn sie nach irgend einer Richtung zusammengepreßt oder ungleich erwärmt werden. Die Elasticität des Aethers wird hierdurch nach verschiedenen Richtungen eine andere und die Bedingung der doppelten Brechung ist gegeben. So erscheint durch ein rechtwinkliges, vierseitiges Prisma, von etwa 1 Zoll Dicke, wenn man es in der Richtung seiner Axe mittelst einer eisernen Presse zusammendrückt, eine vorgehaltene Nadelspitze doppelt. Fresnel zeigte die doppelte Brechung des Lichtes an einem Parallelopiped, welches aus 9 Glasprismen zusammengesetzt war. Er legte nämlich auf eine horizontale Ebene vier rechtwinklige Prismen so neben einander, daß die rechten Winkel alle nach derselben Seite hin lagen. Diese Prismen befanden sich zwischen einem eisernen Schraubstocke, durch den man sie der Länge nach zusammenpressen konnte. In die drei von ihnen gebildeten Zwischenräume wurden drei gleiche, rechtwinklige Prismen gebracht; alsdann wurde noch an jedes Ende ein Prisma von 45° angelegt, um aus den 9 Prismen ein rechtwinkliges Parallelopiped zu erhalten. Alle Prismen waren zusammengekittet, um Reflexionen des Lichts an den inneren Oberflächen zu vermeiden. Durch ein solches Parallelopiped nun müßte das Licht geradlinig fortgehen, wenn die Prismen ihren gewöhnlichen Zustand unverändert beibehielten. Werden aber die vier ersterwähnten

Digitized by Google

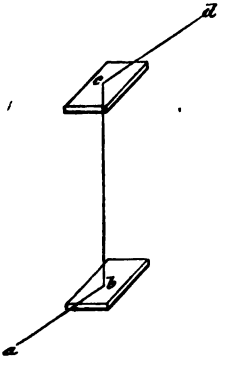
Prismen in der Richtung ihrer Längenaren einem ſtarken Drucke ausgeſetzt, von dem die drei anderen, kürzeren Prismen unberührt bleiben, ſo ſieht man durch das Parallelopiped von einem und demſelben Punkte zwei Bilder, die etwa 1½ Millimeter von einander entfernt ſind. Die Richtung des Druckes iſt hier auch die Richtung der optiſchen Axe. —

Viele doppelt brechende Kryſtalle ſind nach verſchiedenen Richtungen verſchieden gefärbt, indem die beiden durch die doppelte Brechung geſonderten Strahlen eine von ihrer Neigung zur Axe abhängige Färbung haben. Auch kann dieſe verſchiedene Färbung daher kommen, daß in verſchiedenen Richtungen verſchiedenfarbige Strahlen abſorbirt werden. Der Dichroit z. B. zeigt längs ſeiner Axe eine röthliche, in der darauf ſenkrechten Richtung aber eine blaue Farbe. Durchſichtige Körper, welche das Licht einfach brechen, zeigen im durchgelaſſenen Lichte nach allen Richtungen dieſelbe Farbe und unterſcheiden ſich alſo auch in dieſer Beziehung von den doppelt brechenden Kryſtallen.

Neuntes Kapitel.

Von der Polariſation des Lichts.

69. Unter gewiſſen Umſtänden kann ein Lichtſtrahl nach verſchiedenen Seiten hin eigenthümliche Beziehungen erlangen, welche ihn von einem gewöhnlichen Lichtſtrahle unterſcheiden, inſofern dieſer nach allen Richtungen hin dieſelben Eigenſchaften zeigt. Läßt man nämlich einen Lichtſtrahl ab unter einem Winkel von 35° 25′ auf eine ebene Glastafel fallen, ſo wird er zum Theil auf die gewöhnliche Weiſe nach der Richtung bc reflectirt. Fällt nun der Strahl bc unter demſelben Winkel auf eine zweite Glasplatte, welche mit der erſten parallel iſt, ſo wird er von dieſer gleichfalls wie ein gewöhnlicher Strahl nach der Richtung cd reflectirt. Dreht man aber den zweiten Spiegel um eine Axe, welche mit dem Strahle bc zuſammenfällt, ſo wird der Parallelismus beider Spiegel allmälig aufgehoben, während der Winkel, welchen der Strahl bc mit dem zweiten Spiegel macht, unverändert bleibt. Bei dieſer Drehung nimmt die Intenſität des von dem oberen Spiegel reflectirten Strahles beſtändig ab, ſo daß der Strahl bc von dieſem Spiegel gar nicht mehr zurückgeworfen wird



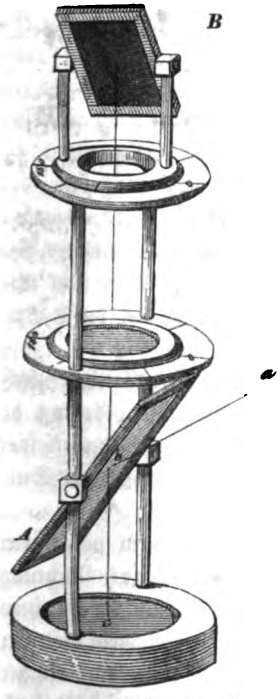
Digitized by Google

wenn die Reflexionsebene des oberen Spiegels mit der des unteren einen Winkel von 90° macht. Dreht man den oberen Spiegel noch weiter um, so stellt sich die Reflexion wieder ein, die Intensität des reflectirten Lichts nimmt allmälig zu und wird am größten, wenn man den oberen Spiegel überhaupt um 180° gedreht hat, wo dann seine Reflexionsebene mit der des unteren wieder parallel ist. Von hier an nimmt bei weiterer Drehung des oberen Spiegels das von ihm reflectirte Licht wieder ab, so daß es bei 270°, wo die Reflexionsebenen beider Spiegel wieder auf einander senkrecht stehen, ganz unmerklich ist. So oft also die Reflexionsebenen beider Spiegel mit einander parallel sind, wird der Strahl bc, welcher vom unteren Spiegel unter einem Winkel von 35° 25′ reflectirt wurde und unter demselben Winkel auf den zweiten Spiegel fällt, vom letzteren vollständig zurückgeworfen, dagegen vollständig durchgelassen oder, sofern der zweite Spiegel geschwärzt ist, absorbirt, wenn die Reflexionsebenen beider Spiegel gekreuzt sind. Man sieht also, daß der Lichtstrahl bc durch seine Reflexion von der unteren Glastafel eigenthümliche Eigenschaften erlangt hat, welche ihn von einem gewöhnlichen Lichtstrahle wesentlich unterscheiden, da dieser nach allen Richtungen von einer spiegelnden Oberfläche reflectirt wird. Einen solchen Lichtstrahl nennt man einen polarisirten.

Zur bequemen und sicheren Darstellung der erwähnten Erscheinung hat man eigene Instrumente, sogenannte Polarisationsapparate, unter denen sich das Nörremberg'sche durch Zweckmäßigkeit empfiehlt.

Zwischen zwei Säulen, welche, wie die Figur andeutet, vertical auf einem Fußgestelle befestigt sind, befindet sich in einem Rahmen eine Tafel von geschliffenem Spiegelglase, die sich um eine horizontale Axe drehen läßt. Dieser Spiegel hat in der Regel eine solche Stellung, daß er mit der Verticalen einen Winkel von 35° 25′ macht. Auf dem Fußgestelle ist ebenfalls ein Spiegel angebracht, der auf der Rückseite geschwärzt ist. An ihrem oberen Ende tragen die Stäbe einen in Grade getheilten Kreis, in welchem ein Ring drehbar ist, der zwei Stäbchen mit einem auf der Rückseite geschwärzten Spiegel trägt. Der letztere ist ebenso wie der untere Spiegel um eine horizontale Axe drehbar und kann dadurch so gestellt werden, daß er mit der Verticalen gleichfalls einen Winkel von 35° 25′ macht. Der Rand des drehbaren Ringes, welcher die Säulchen mit dem oberen Spiegel trägt, ist etwas zugeschärft und in der Mitte der vorderen Hälfte des Ringes befindet sich auf der Zuschärfung eine Linie, welche als Index dient. Fällt

Digitized by Google



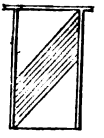
nun ein Strahl ab unter einem Winkel von 34° auf den Spiegel A, so geht er zum Theil durch das Glas hindurch, während ein anderer Theil in verticaler Richtung nach dem Spiegel des Fußgestelles reflectirt wird. Der letztere Strahl, welcher polarisirt ist, wird nun von dem untersten Spiegel wieder in verticaler Richtung zurückgeworfen, so daß er in dieser Richtung durch den Polarisationsspiegel A hindurch zum oberen Spiegel gelangt. Eine durch die Strahlen ab und bc gelegte Verticalebene ist die sogenannte Polarisationsebene des Strahles bc. Denkt man sich durch die Theilstriche 0 und 180° des oberen Kreises eine Verticalebene gelegt, so fällt diese mit der eben erwähnten Polarisationsebene oder mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels zusammen, während eine durch den Index und Mittelpunkt des Ringes gelegte Verticalebene mit der Reflexionsebene des oberen Spiegels zusammenfällt. Steht der Index auf 0, so sind beide Spiegel mit einander parallel und der obere Spiegel B reflectirt den von unten kommenden Strahl, so daß das Gesichtsfeld hell erscheint. Wird nun der obere Spiegel gedreht, ohne seine Stellung gegen die Verticale zu ändern, so wird das Gesichtsfeld allmälig dunkeler, indem immer weniger Licht vom oberen Spiegel reflectirt wird. Wenn der Index bei 90° steht, so hört die Reflexion ganz auf. Bei 180° sind die beiden Spiegel unter einander parallel und die reflectirte Lichtmenge ist dieselbe wie bei 0°. Steht der Index bei 270°, so durchkreuzen sich die Reflexionsebenen beider Spiegel, wie bei 90°, und das Gesichtsfeld erscheint dunkel, u. s. f.

In der Mitte des Apparates sieht man einen Kreis, welcher wie der obere eingetheilt ist; auch in ihm ist noch ein Ring drehbar, dessen Oeffnung mit einer Glasplatte bedeckt ist, um durchsichtige Gegenstände darauf legen zu können. —

Nicht allein die von einer durchsichtigen Glastafel reflectirten, sondern auch die durchgegangenen, gebrochenen Strahlen zeigen sich polarisirt, obgleich in einem geringeren Grade als die ersteren. Man kann sie

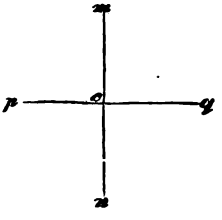
Digitized by Google

dem vollkommenen Polarisationszustande näher bringen, wenn man sie durch mehrere Glasplatten gehen läßt, welche unter einander parallel sind. Bringt man eine Säule von Glasplatten, die sich in einer Röhre befindet, an die Stelle des oberen Spiegels im Polarisationsapparate, so erscheint beim Hindurchsehen durch die Glasplatten das Gesichtsfeld hell, wenn die Reflexionsebene der Platten auf der Reflexionsebene des von unten kommenden Strahles senkrecht steht, dagegen dunkel, wenn die Reflexionsebene der Platten mit der Reflexionsebene des einfallenden Strahles parallel ist. Man sieht also klar den Unterschied zwischen den durch Reflexion und den durch Brechung polarisirten Strahlen.



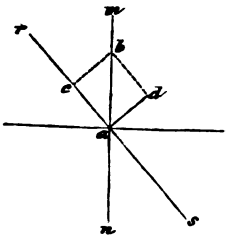
70. Nach den vorstehenden Thatsachen besteht das Wesentliche der Polarisation des Lichts in einer eigenthümlichen Veränderung der Intensität, welche das Licht durch Reflexion oder Brechung erleidet, wenn es unter einem bestimmten Winkel auf eine durchsichtige Substanz fällt.

Der Undulationstheorie zufolge schwingen bei einem polarisirten Lichtstrahle die Aethertheilchen in einer und derselben Richtung, während die Schwingungen eines gewöhnlichen Lichtstrahles von einem Augenblicke zum anderen nach allen Richtungen wechseln können, welche auf der Richtung des Strahles senkrecht sind. Auch erfolgen die Schwingungen der Aethertheilchen eines polarisirten Strahles senkrecht zur Polarisationsebene desselben. Ist nämlich c die Projection eines polarisirten Strahles, der sich rechtwinklig zur Ebene des Papiers fortpflanzt, mn aber die Projection derjenigen Ebene, in welcher die Schwingungen des Strahles vor sich gehen, so ist die auf mn Senkrechte pq die Projection seiner Polarisationsebene. Die letztere ist also eine Ebene, welche durch die Richtung des Strahles senkrecht auf die Schwingungsebene gelegt ist. So ist (s. Figur auf S. 341) abc die Polarisationsebene des Strahles bc, dessen Schwingungen senkrecht zur genannten Ebene stattfinden. Man bemerkt hier auch, daß die Polarisationsebene mit der Reflexions- und daher auch mit der Einfallsebene des Strahles ab zusammenfällt.



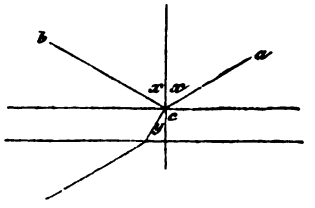
Fällt nun ein durch Reflexion polarisirter Strahl, dessen Schwingungsebene mn ist, auf den oberen Spiegel des Polarisationsapparates, so wird er reflectirt, wenn die Reflexionsebene dieses Spiegels auf der Schwingungsebene des Strahles senkrecht steht. In diesem

Digitized by Google



Falle sind beide Spiegel unter einander und die Schwingungen des Strahles zur spiegelnden Oberfläche parallel. Dreht man nun den oberen Spiegel, so wird die Schwingungsebene des von ihm reflectirten Strahles in eine andere Lage rs kommen. Man denke sich dann jenen Strahl in zwei andere zerlegt, so daß die Schwingungen des einen in der Ebene rs, die des anderen aber in einer dazu senkrechten Richtung stattfinden. Ist nun ab die Schwingungsweite des Strahles, welcher im vorigen Falle reflectirt wurde, wo die Schwingungsebene auf der Reflexionsebene des unteren Spiegels senkrecht war, so ist ac die Schwingungsintensität des reflectirten Strahles, wenn die Schwingungsebene die Lage rs hat. Die Intensität ac ist aber gewiß kleiner als ab, und man sieht, daß die Schwingungsintensität des reflectirten Strahles um so kleiner wird, je mehr sich der Winkel, den die Schwingungsebenen mn und rs mit einander machen, einem rechten nähert. Sobald dieser Winkel ein rechter wird, ist die Schwingungsintensität des zurückgeworfenen Lichtes gleich Null, d. h. der Lichtstrahl wird gar nicht mehr reflectirt. Man sieht aber auch, daß für den durchgehenden Strahl das Entgegengesetzte gilt. Je mehr sich der erwähnte Winkel einem rechten nähert, desto größer wird auch die Schwingungsintensität ad des Strahles, welcher durch den oberen Spiegel hindurchgeht.

71. Für jede Substanz giebt es einen bestimmten Winkel, bei dem die Polarisation des Lichts am vollständigsten von Statten geht. Man nennt diesen Winkel den Polarisationswinkel der Substanz. So ist derselbe für Glas gleich 35° 25′. Je mehr der Winkel, unter dem der Strahl auf den Polarisationsspiegel fällt, von dieser Zahl abweicht, desto geringer ist die Polarisation des Lichts. Brewster ist nun durch vergleichende Versuche zu dem Resultate gelangt, daß die Polarisation am vollständigsten vor sich geht, wenn der reflectirte Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht. Man kann daher aus dem Brechungsverhältnisse den Winkel der vollkommensten Polarisation und umgekehrt aus diesem jenes finden. Ist ac der einfallende Strahl, x der Polarisationswinkel, so hat man y = 90° — x, sin y = cos x und da



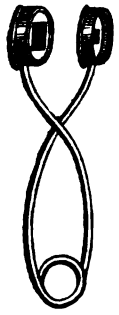
$\frac{\sin x}{\sin y}$ das Brechungsverhältniß ist, auch $\frac{\sin x}{\cos x} = \text{tang } x$. Die Tangente des Winkels x ist also dem Brechungsverhältnisse gleich. Im Zustande der vollkommenen Polarisation schwingen die Aethertheilchen des reflectirten Strahles bc senkrecht zur Ebene des Papiers oder parallel zur Richtung des gebrochenen Strahles. Ist der Einfallswinkel von der Art, daß der reflectirte Strahl nicht mehr senkrecht auf dem gebrochenen steht, so ist ersterer unvollkommen polarisirt, indem die Schwingungen seiner Aethertheilchen nicht mehr ausschließlich senkrecht zur Einfallsebene stattfinden, sondern auch zum Theil in Richtungen, die in der genannten Ebene liegen.

Der Polarisationswinkel ist nicht nur für verschiedene Substanzen verschieden, sondern auch bei einer und derselben Substanz für jede Farbe ein anderer, weil das Brechungsverhältniß für die verschiedenen Farbestrahlen ungleich ist. Man erkennt daraus auch, daß weißes Licht, welches aus allen möglichen Farben besteht, nie ganz vollständig polarisirt werden kann.

72. Bringt man an die Stelle des oberen Spiegels im Polarisationsapparate ein Turmalinplättchen, welches parallel mit seiner Axe geschliffen ist, d. h. dessen Oberflächen mit seiner krystallographischen Hauptaxe parallel sind, so beobachtet man an dem hindurch gegangenen Lichte ganz ähnliche Erscheinungen, wie diejenigen, welche das vom oberen Spiegel reflectirte Licht zeigt. Ist nämlich die Axe des Plättchens senkrecht zur Reflexionsebene des unteren Spiegels oder, was dasselbe ist, senkrecht zur Polarisationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Lichts, so läßt es dieses vollständig durch, dagegen verschwindet das Licht, wenn die Axe parallel mit der erwähnten Polarisationsebene ist. Im ersten Falle sind nun die Schwingungen des Lichts parallel zur Axe des Plättchens, im zweiten aber zu derselben senkrecht. Das Turmalinplättchen läßt daher nur die mit seiner Axe parallelen Schwingungen durch, und es entspricht dies dem Falle, wo die Reflexionsebenen beider Spiegel mit einander parallel sind. Ein solches Turmalinplättchen läßt sich zweckmäßig gebrauchen, um zu erfahren, ob ein Lichtstrahl polarisirt ist oder nicht, indem man den Körper, von dem derselbe kommt, dadurch betrachtet. Das Licht ist polarisirt, wenn es während der Drehung des Plättchens in dem Augenblicke verschwindet, wo die Axe eine senkrechte Stellung zu den Schwingungen der Strahlen hat. Ein Körper, welcher polarisirtes Licht aussendet, wird also durch ein solches Plättchen abwechselnd hell und dunkel erscheinen, je nachdem die Schwingungen des Lichts parallel

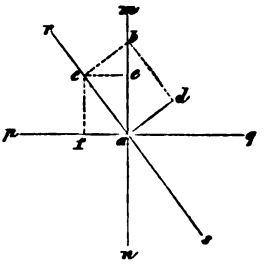
Digitized by Google

oder senkrecht zur Are sind. Auf diese Weise findet man, daß das Licht, welches eine hell beleuchtete Fläche, wie ein von der Sonne beschienenes Schieferdach, ein polirter Tisch, u. s. w. zerstreut, in der Regel mehr oder weniger polarisirt ist. Auch das Licht des Himmels ist häufig polarisirt, da letzterer durch ein Turmalinplättchen betrachtet während der Drehung desselben bald hell, bald dunkel erscheint. Sollte die Lage der Are im Turmalinplättchen unbekannt sein, so läßt sich dieselbe leicht durch einen Versuch bestimmen. Man sehe nämlich durch das Plättchen gegen eine spiegelnde Oberfläche, z. B. gegen einen polirten Tisch, und gebe ihm durch Drehung um eine auf seiner Ebene senkrechte Linie eine solche Stellung, daß es kein Licht durchläßt. Die optische Are des Krystalls liegt dann in der Reflexionsebene des Lichts. Durch Verbindung zweier Turmalinplatten, welche parallel mit ihrer Are geschliffen sind, kann man auch einen sehr einfachen Polarisationsapparat herstellen. Nach dem Obigen läßt eine Turmalinplatte nur solche Strahlen durch, deren Schwingungen parallel mit ihrer Are vor sich gehen. Legt man daher die beiden Plättchen so über einander, daß ihre Aren mit einander parallel sind, so lassen sie das einfallende Licht durch, so, als ob beide Plättchen nur ein einziges von doppelter Dicke bildeten. Durchkreuzen sich aber ihre Aren, d. h. stehen sie auf einander senkrecht, so verschwindet das Licht. Um die Versuche bequem anstellen zu können, bedient man sich einer Zange aus Draht, welche oben zwei Ringe trägt. In jedem derselben befindet sich eine drehbare Hülse, in welche das Turmalinplättchen gefaßt wird. Zu den Versuchen am geeignetsten sind die braunen und dunkelgrünen Turmaline.



73. Bringt man zwischen die gekreuzten Spiegel des Polarisationsapparates eine Turmalinplatte, so muß sie nach dem Früheren dunkel erscheinen, wenn ihre krystallographische Hauptare mit der Reflexionsebene des unteren oder oberen Spiegels parallel ist, außerdem aber hell. Es stelle mn die Schwingungsebene des vom unteren Spiegel kommenden Strahles, pq die dem oberen Spiegel entsprechende Schwingungsebene und rs die Schwingungsebene vor, für welche das dazwischen liegende Turmalinplättchen den Strahl durchläßt; dann kann man sich die Schwingung ab der Aetherheilchen, welche den vom unteren Spiegel kommenden Strahl fortpflanzen, durch den Turmalin in die auf einander senkrechten Schwingungen ac und ad zerlegt denken. Durch das Turmalinplättchen pflanzt sich

Digitized by Google



also ein Strahl fort, dem die Schwingungsintensität a c zukommt. Die Schwingung dieses Strahles wird nun vom oberen Spiegel wiederum nach den auf einander senkrechten Richtungen a e und a f zerlegt, so daß a f die Vibrationsintensität des nach der Richtung p q schwingenden Strahles ist. Man sieht leicht, daß sich der Werth von a f mit der Lage der Ebene r s ändern muß, daß er am größten ist, wenn diese Ebene mit der Schwingungsebene m n einen Winkel von 45° macht, wenn sie also den Winkel halbirt, den die beiden Ebenen m n und p q mit einander bilden. In diesem Falle ist nämlich a f = c e = dem Radius des Kreises, den man sich durch c um den Durchmesser a b beschrieben denken kann. Je mehr der Winkel, den die Ebene r s mit der Schwingungsebene des unteren oder oberen Spiegels macht, von 45° abweicht, desto dunkeler wird das Gesichtsfeld. Fällt endlich r s mit m n oder p q und daher auch der Punkt c mit b oder a zusammen, so wird a f = 0, d. h. wenn die Schwingungsebene r s mit der Schwingungsebene des unteren oder oberen Spiegels zusammenfällt, so ist das Gesichtsfeld ganz dunkel.

74. Im §. 65 sind wir zu dem Schlusse geführt worden, daß ein doppelt brechender Krystall nach einer Richtung, die nicht mit der optischen Axe zusammenfällt, nur solche Schwingungen fortpflanzt, die entweder in der Ebene des Hauptschnittes oder senkrecht gegen dieselbe vor sich gehen. Die letzteren bilden bekanntlich den ordentlich gebrochenen, die ersteren den außerordentlich gebrochenen Strahl. Diese beiden Strahlen sind nun senkrecht zu einandrr polarisirt. Bringt man nämlich zwischen das Auge und ein Kalkspathprisma, dessen brechende Kante mit seiner optischen Axe parallel ist, ein Turmalinplättchen, so verschwindet bald das eine, bald das andere der beiden Bilder, welche das Prisma von einem Gegenstande zeigt. Das eine Bild verschwindet, wenn die Hauptaxe des Turmalins senkrecht steht, das andere aber, wenn diese Axe eine horizontale Lage hat. Im ersten Falle ist die Axe des Turmalins parallel mit der optischen Axe des Prisma's, im zweiten aber senkrecht zu derselben. Da nun eine Turmalinplatte einen polarisirten Lichtstrahl nur dann durchläßt, wenn seine Schwingungen zu ihre Hauptaxe parallel sind, so können bei senkrechter Stellung dieser Axe auch nur solche Schwingungen durch die Platte gehen, welche parallel mit der optischen Axe des

Digitized by Google

Kalkſpathprisma's ſind, bei horizontaler Lage der Turmalinare aber nur ſolche, die ſenkrecht zur optiſchen Are des Kalkſpathes ſtattfinden. In dieſen beiden Fällen iſt nur ein Bild ſichtbar, indem im erſten Falle der im Hauptſchnitte polariſirte Strahl, d. h. der außerordentlich gebrochene, deſſen Schwingungen parallel mit der optiſchen Are ſind, im zweiten Falle aber der ſenkrecht zum Hauptſchnitte polariſirte Strahl, deſſen Schwingungen ſenkrecht zur optiſchen Are des Prisma's ſind, vom Turmalin durchgelaſſen wird. Hierher gehört auch ein Verſuch, der ſchon von Huyghens angeſtellt wurde. Stellt man nämlich zwei Kalkſpathrhomboeder ſo über einander, daß ihre Hauptſchnitte und ſomit auch ihre optiſchen Aren einander parallel ſind, ſo wird der im erſten Kalkſpath auf die gewöhnliche Art gebrochene Strahl auch im zweiten auf dieſelbe Weiſe gebrochen und ebenſo wird der außerordentlich gebrochene Strahl des erſten Kalkſpathes im zweiten wieder nach den Geſetzen der ungewöhnlichen Brechung abgelenkt. Man ſieht daher durch beide Doppelſpathe nur zwei Bilder eines Gegenſtandes. Wenn die Hauptſchnitte auf einander ſenkrecht ſtehen, ſo wird der ordentlich gebrochene Strahl des erſten Kryſtalls im zweiten auf die ungewöhnliche Weiſe gebrochen, während der außerordentliche Strahl des erſten im zweiten die gewöhnliche Brechung erleidet. Auch in dieſem Falle entſtehen nur zwei Bilder. In beiden Fällen hat das zweite Rhomboeder eine ſolche Stellung, daß die Lage ſeines Hauptſchnittes mit einer von den beiden Schwingungsrichtungen der aus dem erſten Kalkſpathe austretenden Strahlen parallel iſt. Haben aber die Hauptſchnitte beider Kryſtalle eine andere Stellung zu einander als in den erwähnten Fällen, ſind alſo die Schwingungen der beiden aus dem erſten Kryſtalle hervortretenden Strahlen weder ſenkrecht noch parallel zum Hauptſchnitte des zweiten Kryſtalls, ſo wird jeder Strahl im letzteren wieder in zwei andere zerlegt, gerade ſo, wie ein gewöhnlicher Strahl, welcher auf einen doppelt brechenden Kryſtall fällt. Von jedem der beiden gebrochenen Lichtſtrahlen des erſten Kryſtalls entſtehen daher im anderen zwei Bilder, ſo daß man durch beide Kryſtalle überhaupt vier Bilder ſieht. Dieſe ſind von gleicher Intenſität, wenn die beiden Hauptſchnitte eine Neigung von 45° zu einander haben, ſonſt aber von verſchiedener. In dieſem Falle wird nämlich jeder Lichtſtrahl des erſten Kryſtalls vom zweiten in zwei Seitenſtrahlen mit gleicher Schwingungsintenſität zerlegt.

Aus den vorſtehenden Betrachtungen erhellet der enge Zuſammenhang zwiſchen der doppelten Brechung und der Polariſation des Lichts. Doppelt brechende Prismen laſſen ſich daher ſehr wohl als

Digitized by Google

polarisirende Apparate gebrauchen und es kann durch sie der obere Spiegel des Polarisationsapparates füglich ersetzt werden. Man faßt zu diesem Behufe das Doppelspathprisma in eine Röhre und bringt diese in den oberen Ring des Instrumentes. Legt man nun auf das in der Mitte befindliche Tischchen unseres Apparates einen schwarzen Schirm, der in seinem Mittelpunkte eine kleine kreisförmige Oeffnung hat, und betrachtet man letztere durch das Prisma, so erscheinen die beiden Bilder abwechselnd hell und dunkel und zwar in der Art, daß das eine hell erscheint, wenn das andere dunkel ist und umgekehrt, wie dies nach dem Obigen nicht anders sein kann.

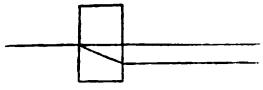
Um die Farbenzerstreuung möglichst zu beseitigen, pflegt man das Doppelspathprisma durch ein Glasprisma zu achromatisiren. Durch ein solches Prisma pflanzen sich nach dem Obigen zwei zu einander senkrecht polarisirte Strahlenbündel fort, welche die beschriebenen Erscheinungen hervorbringen. Nach Nicol läßt sich aber ein Kalkspathprisma construiren, das nur dem einen dieser polarisirten Strahlenbündel den Durchgang gestattet. Man verfertigt ein derartiges Prisma, wenn man die spitzen Kantenwinkel eines kleinen Kalkspathrhomboeders bis zu 68° abschleift und dann das Rhomboeder durch einen Schnitt, welcher durch die spitzen Kantenwinkel und die stumpfen Körperwinkel geht, in zwei gleiche Theile theilt. Die Schnittflächen werden wohl polirt und dann durch Canadabalsam wieder an einander gekittet. Fällt nun auf dieses Prisma in der Richtung seiner Länge ein Lichtstrahl, so wird er zwar durch doppelte Brechung in zwei zu einander senkrecht polarisirte Strahlen zerlegt, aber der ordentlich gebrochene Strahl wird von der Balsamschicht, die auf ihn wie ein schwächer brechendes Mittel wirkt, total reflectirt, während der außerordentlich gebrochene Strahl, hinsichtlich dessen die Balsamschicht ein stärker brechendes Mittel darstellt, durch dieselbe in das andere Prisma dringt, aus dem er an einer zur Eintrittsfläche des Lichts parallelen Ebene zum Vorschein kommt. Wegen des Parallelismus der Ein- und Austrittsfläche ist der durchgehende Strahl achromatisirt.

Das Nicol'sche Prisma läßt sich gut gebrauchen, um Gegenstände, welche sich unter Wasser befinden, deutlicher zu erkennen. Weil nämlich die Oberfläche des Wassers sehr viel Licht reflectirt, so können die aus dem Wasser selbst hervortretenden Strahlen nur einen schwachen Eindruck im Auge hervorbringen. Nun ist aber das vom Wasser zurückgeworfene Licht meist polarisirt, namentlich wenn das auf die Wasserfläche fallende Licht mit dieser einen Winkel von 37° macht. Sieht man daher nach dem Gegenstande durch ein Nicol'sches Prisma,

Digitized by Google

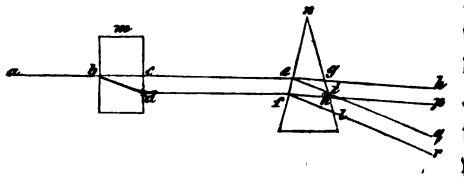
ſo läßt ſich dieſes leicht ſo drehen, daß die vom Waſſer reflectirten und polariſirten Strahlen aufgefangen und nur die aus dem Waſſer kommenden durchgelaſſen werden. Dieſer Verſuch iſt zuerſt von Arago mit einem Turmalinplättchen angeſtellt worden, was jedoch in dieſer Hinſicht weniger gute Dienſte leiſtet, als das farbloſe Nicol'ſche Prisma.

75. Wenn ein homogener Lichtſtrahl auf ein doppelt brechendes Kryſtallplättchen fällt, ſo wiſſen wir, daß er in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Strahlen zerlegt wird. Nehmen wir an, der Strahl falle auf ein Plättchen, deſſen Hauptſchnitt in der Ebene des Papiers liegt. Dann zerfällt er in zwei Strahlen, die in derſelben Richtung aus dem Kryſtalle hervortreten, wenn die Eintritts- und Austrittsfläche einander parallel ſind. Die Schwingungen des gewöhnlich gebrochenen Strahles geſchehen ſenkrecht zur Ebene des Papiers, die des ungewöhnlichen in dieſer Ebene. Nun pflanzen ſich aber dieſe Strahlen mit verſchiedener Geſchwindigkeit durch den Kryſtall fort, da die Elaſticität des Aethers in den verſchiedenen Ebenen, worin die Schwingungen jener Strahlen vor ſich gehen, nicht dieſelbe iſt. Deshalb iſt auch die Wellenlänge für beide Strahlen ungleich und es wird einer dem anderen um eine beſtimmte Länge vorauseilen müſſen. Man ſieht wohl, daß dabei auch die Dicke des Plättchens von Einfluß ſein muß. Fänden nun die Schwingungen beider Strahlen in derſelben Ebene ſtatt, ſo müßte nothwendiger Weiſe aus ihrem Zuſammentreffen eine Interferenz hervorgehen, da aber die Schwingungen des einen Strahles ſenkrecht zu denen des anderen ſind, ſo können ſie ſich nicht völlig aufheben, wie dies der Verſuch beſtätigt. Man bringe nämlich vor das Objectiv eines Fernrohres einen Schirm mit zwei gleichen, parallelen Spalten und vor die letzteren zwei gleich dicke Turmalinplatten. Sind die Polariſationsebenen beider Turmalinplatten einander parallel, ſo ſieht man eine Interferenzerſcheinung, welche aus dem Zuſammentreffen der in einerlei Ebene polariſirten Strahlen hervorgeht. Stehen aber die Polariſationsebenen beider Turmaline auf einander ſenkrecht, ſo fallen die Interferenzſtreifen weg, welche ihren Grund in der gegenſeitigen Störung der von beiden Spalten herkommenden Lichtbündel hatten. In dieſem Falle ſind die durch die Turmaline gehenden Strahlenbündel ſenkrecht zu einander polariſirt. Wir müſſen hieraus zugleich ſchließen, daß die Vibrationen eines Lichtſtrahles ſenkrecht auf ſeiner Fortpflanzungsrichtung ſtattfinden, inſofern nur hierdurch die ganze Erſcheinung begreiflich wird.



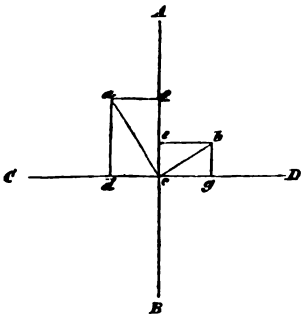
Digitized by Google

76. Fallen nun die Strahlen ce und df auf ein zweites doppelt brechendes Kryſtallplättchen, z. B. auf ein achromatiſirtes Kalkſpathprisma, ſo wird jeder Strahl wieder in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Strahlen zerlegt, ſo daß die Schwingungen des einen ſenkrecht zum Hauptſchnitte des Kryſtalls, die des anderen aber parallel damit vor ſich gehen. Die ordentlich gebrochenen Strahlen gh und kp ſind in einer Ebene polariſirt, ſie können daher zu einer Interferenz gelangen, deren Reſultat von dem Schwingungszuſtande beider Strahlen abhängen wird. Auch die ungewöhnlich gebrochenen Strahlen iq und lr befinden ſich in einerlei Polariſationszuſtande, auch ſie können deshalb interferiren, nur iſt ihre Schwingungsebene ſenkrecht auf der Schwingungsebene der Strahlen gh und kp. Die Interferenzerſcheinung wird aber ſowohl von der Dicke des Plättchens m als auch von der Lage der Polariſationsebene des einfallenden Strahles und der Lage des Prisma's n abhängen. Es ſei ab (ſ. obige Figur) ein homogener, polariſirter Lichtſtrahl, deſſen Polariſationsebene einen Winkel von 45° mit dem Hauptſchnitte des Plättchens m macht. Dieſer Hauptſchnitt liegt hier in der Ebene des Papiers und die Polariſationsebene von ab, welche durch dieſen Strahl geht, macht alſo mit der vorgenannten Ebene einen Winkel von 45°. Der Strahl ab wird dann im Plättchen in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Strahlen von gleicher Intenſität zerlegt. Hat nun auch der Hauptſchnitt des Prisma's n zu dem Hauptſchnitte des Plättchens eine Neigung von 45°, ſo ſpaltet ſich auch ein jeder der Strahlen ce und df im Prisma in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Strahlen von gleicher Intenſität. Die ordentlich gebrochenen Strahlen gh und kp bewegen ſich zwar mit gleicher Geſchwindigkeit durch das Prisma, da aber der eine von dem Strahle ce, der andere von dem Strahle df herrührt, ſo findet dennoch zwiſchen ihnen ein gewiſſer Gangunterſchied ſtatt, der, wie ſchon bemerkt, von der Dicke des Plättchens m abhängt. Die Schwingungen dieſer Strahlen ſind aber ſenkrecht zum Hauptſchnitte, alſo parallel mit den Schwingungen des einfallenden Strahles ab. Auch die ungewöhnlichen Strahlen iq und lr bewegen ſich mit gleicher Geſchwindigkeit durch das Prisma; da aber auch hier der eine von dem Strahle ce, der andere von dem Strahle df herrührt, ſo beſteht zwiſchen ihnen derſelbe von der Dicke des Plättchens m



Digitized by Google

abhängige Unterschied wie bei den kurz zuvor betrachteten Strahlen. Weil indessen ihre Schwingungen im Hauptschnitte des Krystalles vor sich gehen, so sind dieselben senkrecht zu den Schwingungen des einfallenden Strahles ab, wodurch ein neuer Unterschied zwischen ihnen herbeigeführt wird, der einem Gangunterschiede von ½ Wellenlänge gleichgeltend ist. Es seien ca und cb die Schwingungsrichtungen und Schwingungsweiten der beiden Strahlen, welche rechtwinklig zu einander polarisirt aus dem Plättchen hervortreten, AB und CD aber die Richtungen, nach welchen die Schwingungen jener Strahlen durch den zweiten Krystall zerlegt werden, und zwar sei AB die Schwingungsrichtung der gewöhnlichen und CD die der ungewöhnlichen Strahlen. Dann erhält man aus ca : cd und cf, und aus cb : cg und ce. Die Schwingungen ce und cf der gewöhnlichen Strahlen wirken also zusammen, die Schwingungen cd und cg der ungewöhnlichen Strahlen geschehen aber in entgegengesetzten Richtungen oder so, als ob zwischen diesen Strahlen ein Gangunterschied von ½ Wellenlänge bestände, wie oben bemerkt wurde. Man sieht aber auch, daß die Intensität der gewöhnlich gebrochenen Strahlen am größten sein muß, wenn die der ungewöhnlichen am kleinsten ist, und umgekehrt.



Ist nun die Dicke des ersten Plättchens so groß, daß der eine Strahl dem anderen um 1 Wellenlänge vorauseilt, so ist nach dem Obigen der gesammte Gangunterschied der ungewöhnlichen Strahlen, wenn sie aus dem Prisma hervortreten, 1 + ½ — ½ Wellenlängen, der der gewöhnlichen aber nur 1 Wellenlänge, da zwischen diesen außer der Verzögerung, welche das Plättchen m hervorbringt, kein weiterer Unterschied besteht. Die ungewöhnlichen Strahlen heben sich also auf, während das durch die gewöhnlichen Strahlen erzeugte Bild sichtbar bleibt. Ebenso ist es, wenn der eine Strahl dem anderen um 2, 3, 4, ... ganze Wellenlängen vorauseilt oder wenn das Plättchen 2, 3, 4, ... mal dicker als im vorigen Falle ist. Wäre aber die Dicke des Plättchens so groß, daß der eine Strahl dem anderen um ½ Wellenlänge vorauseilte, so wäre der ganze Gangunterschied der ungewöhnlichen Strahlen nach ihrem Durchgange durch das Prisma ½ + ½ — 1 Wellenlänge, und derjenige der ordentlichen nur ½ Wellenlänge. Das gewöhnliche Bild würde also ver-

Digitized by Google

ſchwinden und das ungewöhnliche ſichtbar bleiben. Daſſelbe fände ſtatt, wenn das Plättchen ſo dick wäre, daß der eine Strahl dem anderen um $^3/_2$, $^5/_2$, ... Wellenlängen vorauseilte.

Dreht man das Plättchen m oder n um 90° oder, was daſſelbe iſt, geſchehen die Schwingungen des einfallenden Strahles a b in einer Ebene, welche ſenkrecht auf der vorigen Schwingungsebene iſt, während m und n ihre bisherige Lage beibehalten, ſo findet zwar in jedem der beiden Plättchen eine der vorigen ähnliche Zerlegung ſtatt, aber die im Prisma gewöhnlich gebrochenen Strahlen befinden ſich jetzt in demſelben Schwingungszuſtande, wie im vorigen Falle die ungewöhnlich gebrochenen, d. h. ihre Schwingungen ſind ſenkrecht auf denen des einfallenden Strahles, während die Schwingungen der ungewöhnlichen Strahlen damit parallel ſind. — Da die Wellenlänge verſchiedener homogener Lichtſtrahlen von ungleicher Länge iſt, ſo muß auch die Verzögerung, welche die beiden gebrochenen Strahlen erleiden, bei einem und demſelben Plättchen für verſchiedenfarbige Strahlen verſchieden ſein. Wenn daher für eine beſtimmte Lichtſorte, z. B. für Roth, der eine Strahl dem anderen um $^1/_2$ oder 1 Wellenlänge vorauseilt, ſo wird dies beim violeten Lichte u. ſ. w. nicht eben ſo ſtattfinden. Verſchwindet demnach das gewöhnliche oder ungewöhnliche Bild der rothen Strahlen, ſo werden nicht auch zugleich die gewöhnlichen oder ungewöhnlichen Bilder der übrigen Farbeſtrahlen wegfallen, wenn der urſprüngliche Strahl ein weißer iſt, ſondern die letzteren werden noch in einem gewiſſen Grade wirkſam bleiben. Aus dem Gegenſatze aber, welcher nach dem Obigen zwiſchen den ordentlich und außerordentlich gebrochenen Strahlen beſteht, geht hervor, daß diejenigen Strahlen, welche im gewöhnlichen Bilde zuſammenwirken, im ungewöhnlichen Bilde ſich aufheben müſſen, und umgekehrt. Verſchwinden z. B. in dem einen Bilde die rothen Strahlen, ſo müſſen ſich dieſelben im anderen gegenſeitig unterſtützen, und umgekehrt. Dies gilt eben ſo von den übrigen Farben. Daraus folgt dann, daß bei Anwendung von weißem Lichte zwei Bilder entſtehen müſſen, deren Farben complementär ſind, ſo daß ſie ſich da, wo beide Bilder übereinander fallen, zu Weiß ergänzen. Die Farben der Bilder hängen von dem Gangunterſchiede der zur Interferenz gelangenden Strahlen ab, und da dieſer durch die Dicke des Plättchens bedingt iſt, ſo muß ſich die Färbung mit der Dicke des Plättchens abändern. Neigt man das Plättchen gegen das einfallende Licht, ſo geht dieſes in ſchiefer Richtung hindurch und die Färbung des Plättchens ändert ſich in der Art, als ob es dicker geworden wäre. Bewegen ſich aber die gebro-

Digitized by Google

chenen Strahlen, die gewöhnlichen wie die ungewöhnlichen, mit gleicher Geschwindigkeit durch das Plättchen, was z. B. der Fall ist, wenn es senkrecht zur Axe geschnitten ist, so fällt die von der Dicke des Plättchens abhängende Verzögerung hinweg und daher auch die Farbenerscheinung.

77. Um die im vorigen §. besprochenen Erscheinungen durch den Versuch darzustellen, bringe man auf das mittlere Tischchen des Polarisationsapparates ein Kalkspathplättchen, dessen Hauptschnitt mit der Polarisationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Strahles einen Winkel von 45° macht. Homogenes Licht verschafft man sich dadurch, daß man über das Plättchen ein gefärbtes Glas legt, z. B. ein rothes, das nur die rothen Strahlen durchläßt. An die Stelle des oberen Spiegels bringt man aber ein Kalkspathprisma, durch welches man die Erscheinung betrachtet. So oft nun der Hauptschnitt des Prisma's parallel mit der Polarisationsebene des einfallenden Strahles ist, sieht man nur das gewöhnliche Bild, so oft er aber senkrecht zu dieser Ebene ist, nur das ungewöhnliche Bild. Bei jeder anderen Stellung des Hauptschnitts zur Polarisationsebene sind zwei Bilder sichtbar.

Die Interferenzerscheinungen im polarisirten Lichte lassen sich übrigens auch beobachten, wenn man das doppelt brechende Plättchen zwischen die beiden Spiegel des Apparates bringt. Sind die Spiegel gekreuzt, und fällt der Hauptschnitt des Krystalls mit der Polarisationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Strahles zusammen, so pflanzen sich durch den Krystall nur solche Schwingungen fort, welche senkrecht auf den Hauptschnitt oder parallel zu den Schwingungen des einfallenden Strahles sind. Diese Schwingungen werden aber vom oberen Spiegel nicht reflectirt, daher erscheint das Plättchen dunkel. Steht aber der Hauptschnitt auf der Polarisationsebene des einfallenden Strahles senkrecht, so pflanzen sich nur solche Schwingungen durch das Plättchen fort, welche im Hauptschnitte selbst und also wieder parallel mit den Schwingungen des einfallenden Strahles vor sich gehen. In diesem Falle pflanzt sich mithin der außerordentliche Strahl durch das Plättchen fort, welches aber wieder dunkel erscheint, da dieser Strahl eben so wenig wie der ordentliche vom oberen Spiegel bei seiner dermaligen Stellung reflectirt wird. Macht aber der Hauptschnitt des Plättchens einen Winkel von 45° mit der Polarisationsebene des einfallenden Lichtes, so erscheint es bei Anwendung von homogenem Lichte bald hell, bald dunkel, was von seiner Dicke abhängt. In diesem Falle zerfällt nämlich der einfallende Strahl im

Digitized by Google

Plättchen in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Beſtandtheile, welche nun vom oberen Spiegel eine Zerlegung erfahren, wodurch eine Interferenzerſcheinung hervorgebracht wird. Das Plättchen erſcheint hell, wenn es ſo dick iſt, daß der eine von den beiden in ihm gebrochenen Strahlen dem anderen um ½ oder um irgend ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge vorauseilt; es erſcheint dunkel, wenn der eine Strahl dem anderen um 1 oder um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge vorausgeht. Bringt man daher ein keilförmig geſchliffenes Gyps- oder Quarzplättchen in ſchicklicher Lage zwiſchen die gekreuzten Spiegel des Apparates, ſo gewahrt man eine Reihe abwechſelnd heller und dunkeler Streifen. An der dünnſten Stelle, wo kein Strahl dem anderen vorauseilt, wird ſich ein dunkeler Fleck zeigen; an allen folgenden Stellen, wo die Dicke ſo groß iſt, daß der eine Strahl dem anderen um eine ganze oder um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge vorauseilt, werden dunkele Streifen entſtehen, an allen anderen Stellen aber, wo die Dicke von der Art iſt, daß der eine Strahl dem anderen um ½ oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge vorangeht, müſſen ſich helle Streifen bilden. Für verſchiedene homogene Lichtſtrahlen können die hellen und dunkelen Streifen nicht an dieſelben Stellen des keilförmigen Plättchens fallen, ſondern jedem Streifen wird für eine andere homogene Lichtſorte auch eine andere Dicke des Plättchens entſprechen. Die Streifen rücken um ſo näher zuſammen, je kürzer die Wellen der Lichtſtrahlen ſind, durch welche ſie entſtehen. Wenn daher der einfallende Strahl ein weißer iſt, ſo ſieht man im keilförmigen Plättchen eine Reihe von Farben, welche den verſchiedenen Dicken entſprechen. Dieſe Farben folgen in derſelben Ordnung auf einander, wie die Farben dünner durchſichtiger Schichten im gewöhnlichen Lichte.

Wenn der obere Spiegel des Apparates mit dem unteren einen Winkel von 45° macht, ſo iſt die Polariſationsebene des einen der beiden ſich im Kryſtall fortpflanzenden Strahlen parallel mit der Polariſationsebene des oberen Spiegels, ſo daß dieſer Strahl vom letzteren fortgepflanzt wird. Die Polariſationsebene des anderen Strahles ſteht dagegen ſenkrecht auf der Polariſationsebene des oberen Spiegels, deshalb wird er auch von dieſem nicht fortgepflanzt. Es kann daher auch keine Interferenz der Strahlen, folglich auch keine Farbenerſcheinung ſtattfinden. Sind aber beide Spiegel unter einander parallel, ſo tritt wieder eine Interferenz der aus dem Plättchen hervortretenden Strahlen ein, nachdem ſie vom oberen Spiegel eine Zerlegung erfahren haben. Das Reſultat iſt hier das entgegengeſetzte von demjenigen,

Digitized by Google

welches die Interferenz der Strahlen bei gekreuzten Spiegeln liefert. Daſſelbe Plättchen, welches bei parallelen Spiegeln hell erſcheint, wird ſich zwiſchen gekreuzten dunkel zeigen, ſo daß man hier zwiſchen den vom oberen Spiegel zerlegten Strahlen dieſelbe Beziehung findet wie bei zwei doppelt brechenden Plättchen zwiſchen den ordinären und extraordinären Strahlen. Die Farben, welche das Plättchen zwiſchen gekreuzten und parallelen Spiegeln zeigt, ſind daher complementäre. Bringt man an die Stelle des oberen Spiegels eine Schicht paralleler Glasplatten, ſo iſt die Farbe des Plättchens im durchgelaſſenen Lichte complementär zu der im reflectirten, wie man findet, wenn man die Platten, ohne den Einfallswinkel des Lichts zu ändern, um 90° dreht.

Zu den obigen Verſuchen kann man mit Vortheil Gypskryſtalle verwenden, die ſich leicht zu ſehr dünnen Plättchen ſpalten laſſen.

78. Befindet ſich zwiſchen zwei der Are parallel geſchnittenen Turmalinplatten ein Kalkſpathplättchen, das ſenkrecht zu ſeiner Are geſchliffen iſt, ſo ſieht man, wenn auf die eine Turmalinplatte ein polariſirtes Lichtbündel fällt, durch die andere eine Reihe glänzender, gleichfarbiger (iſochromatiſcher) Ringe. Dieſe Ringe ſind von einem ſchwarzen Kreuze durchſchnitten, wenn die Polariſationsebenen oder, was daſſelbe iſt, wenn die Aren der Turmaline auf einander ſenkrecht ſtehen; ſind dagegen die Aren mit einander parallel, ſo ſieht man an der Stelle des ſchwarzen Kreuzes ein weißes Kreuz (Fig. 2). Zur Darſtellung dieſer Erſcheinung eignet ſich die bekannte Turmalinzange. Man bringt das Kalkſpathplättchen zwiſchen die beiden Turmaline, welche ſich oben in den Ringen der Zange befinden, und giebt dann der einen Platte durch Drehung die ſchickliche Stellung, während man die andere dicht vor das Auge hält. Nehmen wir an, die Hauptſchnitte beider Turmaline ſeien auf einander ſenkrecht. Alle Strahlen nun, welche rechtwinklig auf das Kalkſpathplättchen fallen, gehen ungebrochen hindurch, und weil ihre Schwingungen ſenkrecht zur Are des zweiten Turmalinplättchens ſind, ſo werden ſie von dieſem abſorbirt. So bildet ſich der verticale Theil des ſchwarzen Kreuzes. Der horizontale Theil deſſelben rührt von Strahlen her, die im Kalkſpathe nur die ungewöhnliche Brechung erlitten haben, deren Schwingungen alſo in ſeinem Hauptſchnitte vor ſich gehen. Auch dieſe Schwingungen werden von der Turmalinplatte

1.

2.

Digitized by Google

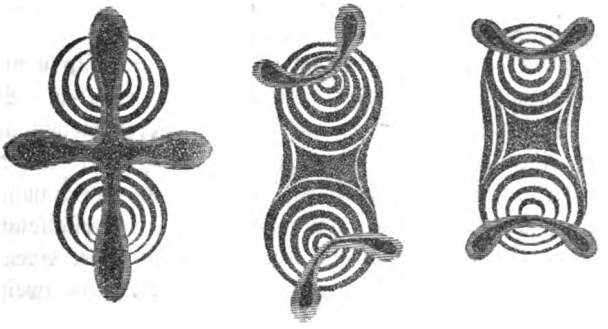
absorbirt, da sie gleichfalls senkrecht zu ihrer Axe stattfinden. Alle anderen Strahlen fallen in schiefer Richtung auf den Kalkspath und werden deshalb von ihm doppelt gebrochen. Solche Strahlen nun, welche in der Mantelfläche eines Kegels liegen, dessen Spitze im Auge und dessen Basis ein auf der Oberfläche des Kalkspathes vom Mittelpunkte des Kreuzes aus beschriebener Kreis ist, sind unter demselben Winkel auf das Plättchen gefallen. An allen Punkten, die im Umringe dieses Kreises liegen, tritt ein ordentlich und außerordentlich gebrochener Strahl aus dem Kalkspathplättchen hervor, von denen der eine dem anderen um eine bestimmte Länge, die von der Dicke des Plättchens abhängt, vorauseilen wird. Ebenso kann man sich noch mehrere mit dem vorigen concentrische Kreise beschrieben denken. Je größer der Halbmesser eines solchen Kreises ist, desto schiefer fallen die Strahlen, welche durch den Umring desselben gehen, auf das Plättchen, desto größer wird auch der Gangunterschied zwischen dem ordentlich und außerordentlich gebrochenen Strahle sein. Wenn nun irgend eine Stelle im Umringe eines solchen Kreises dunkel erscheint, so wird auch der ganze Umring dunkel erscheinen, insofern alle Strahlen, welche von ihm nach dem Auge gelangen, den Krystall in gleicher Neigung gegen die optische Axe durchlaufen haben. Man sieht hiernach leicht, daß sich um die Mitte des Kreuzes eine Reihe heller und dunkeler Kreise bilden muß, da in gewissen Abständen von der Mitte der Gangunterschied zwischen den ordentlichen und außerordentlichen Strahlen bald $\frac{1}{2}$ oder ein ungerades Vielfache einer halben Wellenlänge, bald eine ganze oder ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge betragen wird. Im weißen Lichte müssen aber nach dem Früheren die Kreise farbig erscheinen. Zwischen parallelen Turmalinplatten tritt die complementäre Erscheinung auf.

Die Durchmesser der Ringe verhalten sich verkehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dicken der Plättchen. Besonders deutlich bemerkt man das obige Ringsystem auch noch am salpetersauren Natron, sauren arsenikfauren Kali, Turmalin, Honigstein, schwefelsauren Nickeloxyd, am essigsauren Kalkkupfer und Eis. Diese Krystalle gehören sämmtlich zum einarigen Systeme. Bei manchen Krystallen, z. B. beim Apophyllit und beim unterschwefelsauren Kalk, bemerkt man eine bedeutende Abweichung von der gewöhnlichen Farbenfolge. Bei Plättchen, die nicht genau senkrecht zur Axe geschliffen sind, haben die Ringe eine ovale Form. Eine Unregelmäßigkeit in der krystallinischen Structur der Plättchen giebt sich durch eine Verzerrung der Ringe zu erkennen. Andere Ringe als die einaxigen Krystalle zeigen Plättchen zweiaxiger

Digitized by Google

Kryſtalle, wenn dieſe zu einer ihrer Aren oder zur Halbirungslinie beider Aren ſenkrecht geſchnitten ſind. So ſieht man bei einer Salpeterplatte, deren optiſche Aren einen unbedeutenden Winkel mit einander machen, das Ringſyſtem 1, wenn die Polariſationsebene des

1. 2. 3.



einfallenden Lichts mit der Ebene der beiden Aren zuſammenfällt. Dreht man das Plättchen um einen Winkel von $22^1/_2{}^0$, ſo erſcheint die Figur 2, und bei einer Drehung von 45^0 Figur 3. Die farbigen Ringe werden hier durch Curven gebildet, die man Lemniscaten nennt, wie Herſchel nachgewieſen hat. Eine ſolche Curve iſt dadurch charakteriſirt, daß das Product der Linien, welche von einem beliebigen Punkte der Curve nach den Mittelpunkten der beiden Ringſyſteme gezogen ſind, conſtant iſt. Dieſes Product ändert ſich aber, wenn man von einer Curve zur nächſten übergeht. Dieſe Linien nehmen um ſo mehr an Ausdehnung zu, je dünner das Plättchen geſchliffen iſt. Bei einer ganz dünn geſchliffenen Salpeterplatte ſieht man daher nur noch einige ovale Ringe, welche beide Aren umgeben. Kohlenſaures Bleioxyd zeigt ähnliche Ringſyſteme wie der Salpeter, aber mit einer etwas anderen Farbenfolge. Kryſtalle, deren optiſche Aren einen großen Winkel mit einander machen, geben ein Ringſyſtem wie Figur 4, ſo z. B. der Aragonit. —

4.

In vielen Kryſtallen weichen die Ringſyſteme ſtark von der gewöhnlichen Geſtalt ab, wenn ſie durch weißes Licht hervorgebracht werden. Es rührt dies von der ungleichen Lage der optiſchen Aren für die verſchiedenfarbigen Strahlen her, welche bewirkt, daß die Mittelpunkte verſchiedenfarbiger Ringe nicht zuſammenfallen, obgleich jede einzelne homogene Farbe einen vollkommen regelmäßigen Kreis giebt.

Digitized by Google

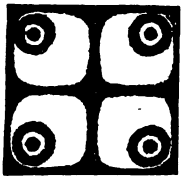
Man kann sich davon nach Herschel überzeugen, wenn man die Erscheinung durch ein gefärbtes Glas betrachtet, welches nur zwei verschiedene Farben durchläßt. Man erblickt dann zwei Ringsysteme, deren Mittelpunkte nicht zusammenfallen. Bei homogenem Lichte fällt daher auch diese Unregelmäßigkeit weg. Besonders auffallend ist die Abweichung der Ringsysteme von der gewöhnlichen Gestalt beim weinsteinsauren Kalinatron und beim essigsauren Bleioxyd.

79. Zur bequemen Beobachtung der Ringsysteme kann man außer der Turmalinzange noch andere Vorrichtungen anwenden. Vermittelst eines Planspiegels, welcher auf der Rückseite geschwärzt und vor dem Laden eines dunkelen Zimmers angebracht ist, leitet man die polarisirten Sonnenstrahlen in paralleler Richtung auf eine Sammellinse. Von dieser fallen die Strahlen convergirend auf die Krystallplatte und dann auf ein Turmalinplättchen, welches sich in seiner Ebene willkürlich umdrehen läßt. Ueber der Turmalinplatte ist eine zweite Linse von etwas kürzerer Brennweite als die erste so angebracht, daß der Abstand beider Linsen etwa gleich der Summe ihrer Brennweiten ist. In dem gemeinschaftlichen Brennpunkte dieser Linsen befindet sich nun eben jene Krystallplatte, an der man das Ringsystem beobachten will. Vermittelst der zweiten Linse läßt sich das Bild des Ringsystems auf einer Wand oder auf einem Schirme darstellen. Dieser Apparat hat eine ähnliche Einrichtung wie das Sonnenmykroskop. Sehr schön sieht man nach Airy die Ringsysteme im Polarisationsapparate vermittelst dreier Linsen von gleicher Brennweite. Das Krystallplättchen befindet sich im gemeinschaftlichen Brennpunkte zweier Linsen, welche um die Summe ihrer Brennweiten von einander entfernt sind und von denen die eine über dem unteren Spiegel des Apparates angebracht ist. Auf diese Linse fallen nun die vom unteren Spiegel polarisirten Strahlen, so daß sie convergirend nach dem Krystallplättchen und von da nach der zweiten Linse gelangen, welche sie in paralleler Richtung nach dem oberen Spiegel des Apparates sendet. Die vom letzteren Spiegel zerlegten Strahlen werden dann nach der dritten Linse reflectirt, von der sie convergirend in's Auge kommen.

80. Wir haben früher gesehen, daß Körper von gleichförmiger Dichte, wie Glas u. dgl., durch Druck oder ungleiche Erwärmung die Eigenschaft, das Licht doppelt zu brechen, erlangen können. Ebenso bringen nun auch geglühte und schnell abgekühlte Glasplatten im polarisirten Lichte Farbenerscheinungen hervor, welche oft sehr schön sind, wie man dies an einem geglühten Glaswürfel beobachten kann, wenn man ihn zwischen die gekreuzten Spiegel des Polarisationsapparates

Digitized by Google

bringt. Man sieht dann eine Erscheinung wie in nebenstehender Figur. Die Ecken zeigen Pfauenaugen, welche durch ein schwarzes Kreuz getrennt sind oder, wenn man den oberen Spiegel dreht, durch ein weißes, womit zugleich die complementären Farben jener Eckzeichnungen auftreten. Man kann den Versuch leicht anstellen, wenn man den Glaswürfel in eine metallene Rahme legt, die zuvor stark erhitzt worden ist. Sobald aber der Glaswürfel eine gleichförmige Temperatur angenommen hat, verliert sich die Erscheinung. Dieselbe Farbenerscheinung zeigen schnell gekühlte, über einander liegende Glasplatten. Ein geglühter massiver Glascylinder giebt Ringe, welche von einem Kreuze durchschnitten sind.



Bringt man diesen Körpern durch Druck eine ungleichförmige Elasticität bei, so zeigen sie gleichfalls Farbenerscheinungen. Drückt man daher einen Glaswürfel vermittelst einer Presse, wie sie die Figur darstellt, zusammen, so giebt er im Polarisationsapparate in der Richtung der Compression eine Farbenerscheinung, die mit der Stärke des Druckes veränderlich ist. Auch Glasstreifen, deren Theilchen durch Biegen in einen gespannten Zustand versetzt sind, brechen das Licht doppelt und zeigen im Polarisationsapparate farbige Streifen.

Die in diesem §. besprochenen Erscheinungen wurden von Brewster und Seebeck entdeckt.

81. An einem anderen Orte haben wir gesehen, wie man ein parallel mit seiner Axe geschliffenes Turmalinplättchen gebrauchen kann, um zu erfahren, ob ein von irgend einem Gegenstande kommender Lichtstrahl polarisirt ist oder nicht. Da nun jene Farbenringe durch Interferenz polarisirter Lichtstrahlen entstehen, so lassen sie sich ebenfalls als ein treffliches Kennzeichen solcher Strahlen benutzen. Man befestigt nämlich ein parallel mit der Axe geschliffenes Turmalinplättchen an ein senkrecht zur Axe geschnittenes Kalkspathplättchen und sieht dann durch das erstere nach dem Gegenstande hin, von dem die Strahlen kommen. Erscheinen Farbenringe, so ist das Licht polarisirt, im Gegentheile aber nicht. Man nennt eine solche Vorrichtung ein Polariskop. Zwei gleich dicke Quarzplatten, welche unter einem Winkel von 45° gegen die Axe geschnitten sind, zeigen, wenn sie in gekreuzter Lage in die Turmalinzange gebracht werden, farbige Streifen, von denen aber der mittlere schwarz ist. Savart verband zwei

Digitized by Google

derartige Quarzplatten in gekreuzter Lage mit einem Turmalinplättchen, deſſen Are den Winkel, welchen die Aren jener Platten mit einander machen, halbirte. Durch dieſen Apparat ſieht man immer farbige Streifen, wenn das einfallende Licht auch nur im Geringſten polariſirt iſt. Die Farben dieſer Streifen erſcheinen um ſo glänzender, je vollkommener die Polariſation des einfallenden Lichts iſt.

82. Eine Bergkryſtallplatte, welche ſenkrecht zur Are geſchliffen iſt, zeigt im polariſirten Lichte ganz andere Erſcheinungen, wie die übrigen einarigen Kryſtalle, was zuerſt von Arago beobachtet wurde. Wenn man ein ſolches Plättchen aus Bergkryſtall auf den mittleren Tiſch des Polariſationsapparates legt, ſo erblickt man im oberen Spiegel ein lebhaft gefärbtes Bild, deſſen Farben aber wechſeln, wenn man den Spiegel dreht. Am einfachſten läßt ſich die ganze Erſcheinung vermittelſt homogenen Lichts beobachten, indem man etwa durch ein roth gefärbtes Glas nach dem oberen Spiegel hinſieht. Dreht man nun den letzteren, während das Plättchen auf dem mittleren Tiſche des Apparates liegt, ſo findet man, daß bei einer Drehung von 19° das meiſte rothe Licht reflectirt wird. Ohne das Plättchen würde ſich bekanntlich das Maximum des vom oberen Spiegel reflectirten Lichts bei 0° gezeigt haben. Dreht man den Spiegel weiter um, ſo tritt ein zweites Maximum des reflectirten Lichts bei 199° und nicht, wie gewöhnlich, bei 180° ein. Dagegen wird gar kein Licht reflectirt bei 109° und 289°, was ſonſt bei 90° und 270° geſchieht. Die Polariſationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Strahles iſt alſo nach ſeinem Durchgange durch das Plättchen um einen Winkel von 19° nach der Rechten hin gedreht worden. Für verſchiedene homogene Farbeſtrahlen iſt dieſer Drehungswinkel von verſchiedener Größe. So wird für violetes Licht die Polariſationsebene des urſprünglichen Strahles um 41° nach der Rechten gedreht. Daher der erwähnte Farbenwechſel bei Anwendung von weißem Lichte. Die Drehung iſt aber auch der Dicke des Plättchens proportional. War die vorige Platte 1 Millimeter dick und nimmt man jetzt eine 2 Mllr. dicke Quarzplatte, ſo macht die Polariſationsebene des durch die Platte gehenden Strahles einen Winkel von 38° mit der urſprünglichen Polariſationsebene, bei violetem Lichte einen Winkel von 82°. Außerdem kommt noch der intereſſante Umſtand hinzu, daß durch manche Quarzplatten die Polariſationsebene nach der Linken gedreht wird, inſofern man den oberen Spiegel des Apparates nach der linken Seite hin drehen muß, um die beſagte Erſcheinung hervorzubringen. Daher ſpricht man von rechts und links drehenden Quarzplatten, je nachdem durch ſie die

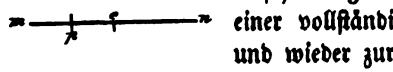
Digitized by Google

Polarisationsebene nach der rechten oder linken Seite aus ihrer anfänglichen Lage gedreht wird.

Man kann diese Erscheinung auch hervorrufen, wenn man an die Stelle des oberen Spiegels ein Doppelspathprisma bringt. In dem letzteren wird dann der durch das Quarzplättchen gegangene polarisirte Strahl in zwei andere zerlegt, deren Farben complementär sind. Sobald man das Prisma dreht, findet ein Wechsel dieser Farben statt. Man wende nun wieder homogenes Licht an. Wenn der Hauptschnitt des Prisma's parallel mit der Polarisationsebene des vom unteren Spiegel kommenden Strahles ist, so sollte das ungewöhnliche Bild verschwinden, falls sich das Quarzplättchen wie ein anderer einaxiger Krystall verhielte. Dies ist aber nicht der Fall, sondern man muß das Prisma erst um einen gewissen Winkel drehen, um das erwähnte Bild verschwinden zu machen. Nimmt man nun bei der dermaligen Stellung des Prisma's das Quarzplättchen hinweg und ersetzt es durch ein anderes von doppelter Dicke, das aus demselben Krystalle geschnitten ist, so kommt das ungewöhnliche Bild wieder zum Vorschein und man muß das Prisma um denselben Winkel, wie vorher, weiter drehen, damit dieses Bild von Neuem verschwindet. Bringt man hierauf an die Stelle des zweiten Plättchens ein drittes, das dreimal so dick wie das erste ist, so muß man das Prisma nochmals um einen gleichen Winkel drehen, um das ungewöhnliche Bild verschwinden zu lassen. Beim zweiten Plättchen ist also der Drehungswinkel doppelt so groß als beim ersten, welches nur halb so dick ist, beim dritten aber dreimal so groß als beim letzterwähnten. Hieraus folgt also gleichfalls, daß der Drehungswinkel der Dicke des Quarzplättchens proportionirt ist.

83. Die beschriebene Erscheinung führt den Namen der *Kreispolarisation* des Lichts, weil sie nämlich daher rührt, daß der Bergkrystall längs seiner Axe nur circular polarisirte Strahlen, d. h. solche, deren Schwingungen in einem Kreise geschehen, fortpflanzen kann. Die Art und Weise, wie diese Strahlen entstehen, ergiebt sich einfach aus nachstehender Betrachtung.

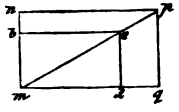
Es sei $mn = a$ die Schwingungsweite eines in gerader Linie vibrirenden Theilchens, $mp = x$ der Abstand desselben von seiner Gleichgewichtslage c am Ende irgend einer Zeit t (Phasenzeit), v seine Geschwindigkeit in diesem Moment, T die Dauer einer vollständigen Schwingung von m nach n und wieder zurück und c endlich die größte Geschwindigkeit, welche dem Theilchen zukommt, wenn es gerade die



Gleichgewichtslage c passirt. Man denke sich nun auf einem Kreise, welcher mit dem Halbmesser 1 beschrieben ist, einen Bogen y, der sich zur ganzen Peripherie 2π verhält wie die Phasenzeit t zur ganzen Schwingungsdauer T, so daß man also hat $y : 2\pi = t : T$ oder $y = 2\pi \frac{t}{T}$. Dann verhält sich der Abstand x des vibrirenden Theilchens von der Gleichgewichtslage zur ganzen Schwingungsweite a, wie der Sinus des Bogens y zur Einheit, nämlich $x : a = \sin 2\pi \frac{t}{T} : 1$, und die Geschwindigkeit v des Theilchens am Ende der Zeit t zur größten Geschwindigkeit c oder zur Schwingungsintensität wie der Cosinus desselben Bogens zur Einheit, also $v : c = \cos 2\pi \frac{t}{T} : 1$. Man hat daher $x = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$ und $v = c \cos 2\pi \frac{t}{T}$.

Diese Formeln lassen sich leicht aus dem Ausdrucke für die beschleunigende Kraft eines einfachen Pendels mit Hilfe der Figur auf Seite 85 ableiten, wenn man bedenkt, daß die geradlinige Schwingung eines Aethertheilchens mit der Bewegung eines solchen Pendels übereinkommt, unter der Voraussetzung, daß sich dieses nur wenig von der Gleichgewichtslage entfernt. Die beschleunigende oder verzögernde Kraft ist dann dem Abstande des schwingenden Punktes von der Ruhelage gerade proportionirt*).

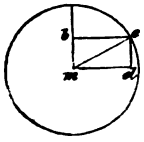
Wird nun ein Aethertheilchen gleichzeitig durch zwei geradlinige Schwingungen von gleicher Dauer T, die einen Winkel mit einander bilden und deren Phasen übereinstimmen, zu einer Oscillation bestimmt, so muß diese wieder geradlinig sein und dieselbe Dauer T haben, während ihre Weite gleich der Diagonale des Parallelogramms ist, das sich aus den Weiten jener Oscillationen construiren läßt. Legt nämlich das schwingende Theilchen in Folge der einen Oscillation in der Zeit t den Weg mb und vermöge der anderen in derselben Zeit den Weg md zurück, so ist es unter gleichzeitiger Einwirkung beider Oscillationen am Ende der Zeit t im Punkte e der Diagonale mp. Im ersten Falle ist $mb = mn \sin 2\pi \frac{t}{T}$, im zweiten Falle $md = mq \sin 2\pi \frac{t}{T}$, daher auch $mb : md = mn : mq$.



*) Baumgärtner's Naturlehre. S. 276.

Digitized by Google

Wenn aber das Aethertheilchen gleichzeitig durch zwei Schwingungen von gleicher Dauer, welche zu einander rechtwinklig sind und deren Phasenzeiten t und t′ um ¼ der Schwingungsdauer T unterschieden sind, angeregt wird, so macht es eine kreisförmige Schwingung, deren Halbmesser gleich der gemeinschaftlichen Weite a jener Schwingungen ist. Denn ist mb der Abstand des Theilchens vom Gleichgewichtspunkte m am Ende der Zeit t, wenn die eine Schwingung allein darauf wirkte, und md der Abstand von demselben Punkte zur Zeit t′, wenn es nur von der anderen Schwingung in Bewegung gesetzt würde, so ist $mb = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$ und $md = a \sin 2\pi \frac{t'}{T}$. Da nun $t' - t = \frac{1}{4} T$ sein soll, so hat man $t' = \frac{1}{4} T + t$ und, wenn man diesen Werth von t′ in die zweite Gleichung setzt, $md = a \sin \left(\frac{\pi}{2} + 2\pi \frac{t}{T}\right) = a \cos 2\pi \frac{t}{T}$. Daher ist $me^2 = mb^2 + md^2 = a^2$ oder $me = a$. Der Abstand des Aethertheilchens vom Gleichgewichtspunkte m ist also während der ganzen Dauer seiner Bewegung stets = a, d. h. es beschreibt einen Kreis vom Halbmesser a. Die Geschwindigkeit, mit der diese Kreisbewegung geschieht, ist gleich der gemeinschaftlichen Intensität c jener Schwingungen, wovon man sich sehr leicht überzeugt, wenn man die Ausdrücke für die Geschwindigkeiten dieser letzteren am Ende der Zeiten t und t′, nämlich $v = c \sin 2\pi \frac{t}{T}$ und $v' = c \sin 2\pi \frac{t'}{T} = c \cos 2\pi \frac{t}{T}$ in's Quadrat erhebt und addirt. Wenn aber der Phasenunterschied $t' - t$ der beiden zu einander senkrechten Schwingungen, welche das Theilchen gleichzeitig afficiren, mehr oder weniger als ¼ der Schwingungsdauer beträgt oder wenn ihre Weiten ungleich sind, so ist die resultirende Bewegung des Theilchens eine elliptische Schwingung.

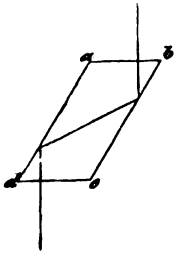


Einen Lichtstrahl nun, dessen Schwingungen senkrecht zu seiner Fortpflanzungsrichtung in kreisförmigen Bahnen geschehen, nennt man einen circular polarisirten, einen solchen aber, dessen Schwingungen in elliptischen Bahnen stattfinden, einen elliptisch polarisirten Strahl. Man sieht aber auch, daß die Aethertheilchen, welche einen circular oder elliptisch polarisirten Strahl fortpflanzen, ihre Bahnen auf zweierlei Weise vollenden können, nämlich entweder von der Rechten gegen die Linke oder im umgekehrten Sinne. Deshalb kann es rechts und links circular oder elliptisch polarisirtes Licht geben.

Digitized by Google

Man denke sich einen kreisförmig polarisirten Lichtstrahl, der von einem Punkte aus in horizontaler Richtung nach dem Auge hin fortschreitet. Ist nun dieser Strahl rechts polarisirt, so bewegen sich die Aethertheilchen in der oberen Hälfte ihrer kreisförmigen Bahn von der Linken zur Rechten, in der unteren Hälfte aber von der Rechten zur Linken. Da sich die kreisförmige Schwingung, wie jede andere, allmälig von Theilchen zu Theilchen fortpflanzt, so können die weiter vom Ausgangspunkte des Strahles gelegenen Theilchen sich nicht in derselben Stelle ihrer Bahn befinden wie die jenem Punkte näher gelegenen Theilchen, welche offenbar schon weiter in ihrer Bahn fortgeschritten sein müssen. Die kreisförmigen Bahnen sämmtlicher Aethertheilchen, welche den circular polarisirten Strahl fortpflanzen, stellen zusammen einen Cylinder dar, dessen Are die Richtung des Strahles selbst ist. Denkt man sich nun die Orte, welche die Aethertheilchen in irgend einem Moment in ihren Bahnen einnehmen, durch eine Linie verbunden, so erhält man eine Schraubenlinie, die in unserem Falle eine rechts gewundene sein wird. Die Höhe des Schraubenganges entspricht der Wellenlänge des Strahles. Während der Fortpflanzung des letzteren dreht sich die Schraubenlinie mit gleichförmiger Geschwindigkeit von der Linken gegen die Rechte um ihre Are. Bei einem links polarisirten Strahle verhält es sich umgekehrt.

Fresnel hat, geleitet durch theoretische Betrachtungen, ein Parallelopiped so construirt, daß es den oben auseinandergesetzten Bedingungen gemäß einen circular polarisirten Lichtstrahl liefert. Das Parallelopiped bestand aus Crownglas mit dem Brechungsexponenten 1,5; die Winkel b und d waren gleich 54°. Ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl nun, welcher senkrecht gegen die Fläche cd einfällt, tritt nach zwei inneren totalen Reflexionen senkrecht gegen die Ebene ab circular polarisirt hervor, wenn das Parallelopiped eine solche Stellung hat, daß die Ebene der inneren Reflexion einen Winkel von 45° mit der ursprünglichen Polarisationsebene macht. Die beiden Strahlen nämlich, von denen der eine in der Reflexionsebene, der andere senkrecht dazu (geradlinig) polarisirt ist, sind von gleicher Intensität, aber durch die totale Reflexion in einem gewissen Phasenunterschiede, welcher sich durch Rechnung bestimmen läßt. Bei dem erwähnten Glase beträgt dieser Unterschied für jede innere Reflexion $^1/_8$ einer Schwingung und daher für beide Reflexionen $^1/_4$ derselben, so daß der eine Strahl dem anderen um $^1/_4$ Wellenlänge vorauseilt.



Digitized by Google

Beide geben daher nach dem Früheren einen kreisförmig polarisirten Strahl. Dieser zeigt sich von einem geradlinig polarisirten Lichtstrahle wesentlich verschieden, wie man sogleich findet, wenn man ihn durch ein Doppelspathprisma analysirt. Man kann das letztere zu diesem Behufe in den oberen Ring des Polarisationsapparates bringen, während man das Parallelopiped auf das mittlere Tischchen stellt. Dreht man nun das Parallelopiped um eine Axe, welche auf der Eintrittsfläche des Lichts senkrecht ist, so ändert sich zwar die Lichtstärke des einen oder des anderen der beiden Bilder, welche das Prisma liefert, aber keines kommt zum völligen Verschwinden. Macht die Reflexionsebene des Parallelopipeds einen Winkel von 45° mit der Reflexionsebene des unteren Spiegels, so findet gar keine Aenderung in der Intensität der Bilder statt. Läßt man bei dieser Stellung des Parallelopipeds den aus dem letzteren hervortretenden Strahl in ein zweites Parallelopiped, das mit jenem gleiche Beschaffenheit hat, eintreten, so verwandelt er sich nach zwei totalen inneren Reflexionen wieder in einen geradlinig polarisirten Strahl, dessen Polarisationsebene aber gegen die Reflexionsebene des zweiten Parallelopipeds um einen Winkel von 45° geneigt ist. Bei einem unpolarisirten Strahle würde so etwas nicht stattgefunden haben und jener Strahl ist daher auch von diesem wesentlich verschieden.

Ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl kann durch Reflexion von einer polirten Metallfläche elliptisch polarisirt werden, wenn er diese unter einem bestimmten Winkel trifft und wenn die Reflexionsebene derselben mit der Polarisationsebene des einfallenden Strahles einen Winkel von 45° macht. Der auf diese Weise elliptisch polarisirte Strahl kann durch Reflexion von einem zweiten Metallspiegel, welcher dem ersten parallel ist, in den Zustand der geradlinigen Polarisation zurückversetzt werden, aber die Polarisationsebene des Strahles ist dann um weniger als 45° gegen die frühere Polarisationsebene geneigt, ein Umstand, wodurch sich der elliptisch polarisirte Strahl von dem kreisförmig polarisirten unterscheidet. —

Jede geradlinige Schwingung läßt sich in zwei entgegengesetzte circulare zerlegen, weshalb man sich jeden geradlinig polarisirten Lichtstrahl aus zwei entgegengesetzt circular polarisirten Strahlen zusammengesetzt denken kann. Bewegen sich nun durch ein Bergkrystallplättchen, das senkrecht zu seiner Axe geschnitten ist, in der Richtung der letzteren zwei entgegengesetzte circular polarisirte Strahlen mit ungleicher Geschwindigkeit hindurch, so setzen sie sich beim Austritte aus dem Krystalle wieder zu einem geradlinig polarisirten Strahle zusam-

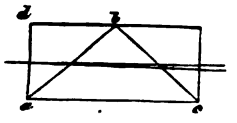
Digitized by Google

men, deſſen Richtung aber von der des einfallenden Strahles verſchieden ſein wird, womit die früher beſchriebene Drehung der Polariſationsebene gerade zuſammenhängt. Die Schwingungsrichtung des aus dem Plättchen hervortretenden geradlinig polariſirten Strahles iſt aber durch die Anzahl der Wellenlängen bedingt, um welche der eine der beiden circular polariſirten Strahlen dem anderen vorauseilt. Dies hängt wieder von der Dicke des Plättchens ab. Die Polariſationsebene wird aber nach der Rechten oder Linken gedreht, je nachdem der rechts oder links rotirende Strahl ſich mit größerer Geſchwindigkeit durch den Kryſtall bewegt. Iſt daher die Dicke des Plättchens gleich Null oder von der Art, daß ſich beide circular ſchwingende Strahlen mit gleicher Geſchwindigkeit fortpflanzen, ſo fällt die Polariſationsebene des austretenden Strahles mit der des urſprünglichen zuſammen. Bei einem und demſelben Plättchen iſt der Gangunterſchied beider Strahlen für verſchiedenfarbiges Licht ungleich und daraus erklärt ſich der Farbenwechſel bei Anwendung von weißem Lichte. Bringt man nämlich über das Quarzplättchen im Polariſationsapparate ein Doppelſpathprisma, ſo wird der aus jenem kommende Lichtſtrahl bekanntlich in zwei zu einander ſenkrecht polariſirte Strahlen zerlegt, von denen die Schwingungen des gewöhnlichen Strahles ſenkrecht zum Hauptſchnitte, die des ungewöhnlichen aber im Hauptſchnitte ſelbſt ſtattfinden. Wenn nun die Ebene des Hauptſchnitts bei homogenem Lichte (z. B. rothem) mit der Polariſationsebene des einfallenden Strahles übereinkommt, ſo verſchwindet, wie wir wiſſen, das ungewöhnliche Bild. Da aber bei dieſer Stellung des Prisma's die ungewöhnlichen Bilder der übrigen Farbeſtrahlen nicht verſchwinden, ſo müſſen dieſe, wenn man weißes Licht anwendet, noch ſichtbar bleiben, ſo daß ſie zuſammen ein ungewöhnliches Bild geben, das die complementäre Farbe von Roth hat.

Zwiſchen den gekreuzten Spiegeln des Polariſationsapparates zeigt das Quarzplättchen nur einen runden Fleck, deſſen Farben von ſeiner Dicke abhängen. Hier wird die Erſcheinung von Strahlen bewirkt, die das Plättchen genau in der Richtung der optiſchen Axe durchlaufen haben. Bringt man aber das ſenkrecht zur Axe geſchnittene Quarzplättchen in die Turmalinzange, ſo kommen, wenn man ſie dicht vor das Auge hält, in das letztere auch ſolche Strahlen, welche die Platte in ſchiefer Richtung durchlaufen haben. Man ſieht dann auch eine Reihe farbiger Kreiſe, welche zwar mit denjenigen anderer einariger Kryſtalle übereinkommen, aber von dem ſchwarzen Kreuze ſind nur noch ſchwache Spuren am Umfange der Figur zu erkennen.

Digitized by Google

84. Fresnel hat wirklich mittelst eines aus rechts und links drehenden Prismen zusammengesetzten Apparates die beiden circular polarisirten Strahlen, welche sich im Bergkrystalle längs seiner Axe fortpflanzen, von einander gesondert. Die Figur zeigt den Durchschnitt



dreier Prismen aus Bergkrystall, die an den Flächen ab und bc sorgfältig mit einander verbunden sind. Der brechende Winkel des mittleren Prisma's hat einen Werth von 152° und in allen drei Prismen hat die Axe einerlei Richtung. Die Grenzflächen der äußeren Prismen stehen auf der letzteren senkrecht. Während das mittlere Prisma aus einem rechts drehenden Krystalle besteht, müssen die beiden anderen aus einem links drehenden geschnitten sein, und umgekehrt. Fällt nun auf die Fläche ad ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl, so wird er in zwei andere gespalten, die in verschiedenen Richtungen aus dem Apparate hervortreten, woraus dann folgt, daß der Bergkrystall in der Richtung seiner Axe eine doppelte Brechung bewirkt. Die letztere ist aber ganz verschieden von derjenigen, welche wir an anderen Krystallen beobachten, da die beiden in verschiedenen Richtungen austretenden Strahlen, von einer Turmalinplatte oder einem Doppelspathprisma aufgefangen, die gewöhnlichen Polarisationserscheinungen nicht zeigen, was eben daher kommt, daß sie circular polarisirt sind. Die beiden in entgegengesetzter Richtung rotirenden Strahlen durchlaufen das erste Prisma mit ungleicher Geschwindigkeit und werden deshalb im zweiten nach verschiedenen Richtungen gebrochen. Da aber das mittlere Prisma nach dem Obigen im entgegengesetzten Sinne drehend wirkt, so muß derjenige Strahl, welcher sich im ersten schneller fortbewegte, im zweiten der langsamere sein, und umgekehrt. Hierdurch wird nun eben ein merkliches Auseinandertreten der beiden Strahlen bewirkt, was noch bedeutender sein muß, wenn sie das dritte Prisma durchlaufen haben, da sich dieses in Beziehung auf das zweite ebenso verhält wie das letztere hinsichtlich des ersteren.

Wenn man zwei Bergkrystalle von gleicher Dicke, von denen der eine rechts, der andere links drehend ist, im Polarisationsapparate auf einander legt, so erblickt man eine sehr schöne Farbenerscheinung, deren Form die Figur zeigt.

85. Außer dem Bergkrystalle haben auch viele Flüssigkeiten die Eigenschaft, das Licht kreisförmig zu polarisiren, wie Biot

Digitized by Google

entdeckt hat. So wird die Polarisationsebene des einfallenden Lichts durch Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser, Lösungen von arabischem Gummi und Inulin von der Rechten zur Linken, durch Citronenöl, Zuckersyrup, Auflösungen von Kampher in Alkohol, Dextrin und Auflösungen von Weinsteinsäure aber von der Linken gegen die Rechte gedreht. Indessen wird durch diese Stoffe das einfallende Licht viel weniger von seiner ursprünglichen Polarisationsrichtung entfernt als durch den Bergkrystall. Man muß daher ziemlich hohe Säulen dieser Flüssigkeiten anwenden, um in ihnen die Kreispolarisation zu beobachten. Nach Biot's Untersuchungen wird die Polarisationsebene eines rothen Strahles, den ein mit Kupferoxyd gefärbtes Glas hindurchläßt, durch eine Quarzplatte von 5 Millimeter Dicke um 92°, durch eine ebenso dicke Terpentinsäule aber nur um 14° und durch eine Citronenölschicht von eben der Dicke um 21° gedreht. Auch im Dampfe des Terpentinöls wird das Licht kreisförmig polarisirt. Die Kreispolarisation läßt sich benutzen, um den Concentrationsgrad von Zuckerlösungen zu ermitteln, da nämlich ihr Drehungsvermögen um so bedeutender ist, je concentrirter sie sind.

Will man nun die Circularpolarisation einer Flüssigkeit untersuchen, so schließt man sie in eine Glasröhre, welche einige Zoll lang ist, ein, bedeckt die Röhre unten und oben oder auch nur unten mit einer ebenen Glasplatte und bringt sie auf das mittlere Tischchen des Polarisationsapparates. Man sieht dann nach, bis zu welchem Grade die Polarisationsebene durch die Flüssigkeit rechts oder links gedreht wird. Zur Beobachtung der Kreispolarisation in Flüssigkeiten kann man sich auch zweier Nicol'scher Prismen bedienen, die an den beiden Enden einer 8 — 10″ langen, horizontal liegenden Glasröhre, worin sich die Flüssigkeit befindet, angebracht sind.

Zehntes Kapitel.

Von den chemischen Wirkungen des Lichts.

86. Schon an einem anderen Orte haben wir auf hierher gehörige Erscheinungen aufmerksam gemacht. Wasserstoff und Chlor verbinden sich im Sonnenlichte unter einer Explosion, langsamer im Tageslichte; Phosphor, welcher sich unter Wasser befindet, geht durch Sonnenlicht in rothes Phosphoroxyd über; concentrirte Salpetersäure verliert darin einen Theil ihres Sauerstoffes und verwandelt sich in

Digitized by Google

gelbe salpetrige Säure; Chlorsilber wird geschwärzt, indem sich ein Theil seines Chlors davon trennt, Gold wird aus manchen seiner Auflösungen niedergeschlagen, u. s. w.

Auch organische Substanzen erleiden durch das Licht eine Zersetzung, indem es die Verbindung des atmosphärischen Sauerstoffes mit dem Kohlen- und Wasserstoff dieser Substanzen begünstigt. Hierauf beruht das Bleichen vegetabilischer Stoffe im Sonnenlichte.

Pflanzen und Thiere bedürfen zu ihrer vollen Entwickelung des Sonnenlichts. Bekanntlich wenden sich im Dunkeln gezogene Pflanzen dem Lichte zu. Die Blätter und anderen grünen Theile der Pflanzen nehmen aus der Atmosphäre und dem Wasser Kohlensäure auf, welche unter Mitwirkung des Sonnenlichts eine Zerlegung erfährt, dergestalt, daß der Kohlenstoff in der Pflanze bleibt, während der Sauerstoff der Atmosphäre zurückgegeben wird.

Die chemische Wirksamkeit der verschiedenen Bestandtheile des Sonnen- und Tageslichts ist aber sehr ungleich. So vereinigen sich Wasserstoff und Chlor in einem rothen Glase nicht, in einem blauen oder violeten aber eben so wie im weißen Lichte. Genauer ist dies von Berard untersucht worden. Er leitete die Sonnenstrahlen mittelst eines Heliostats in ein verfinstertes Zimmer auf ein Prisma und ließ das durch letzteres hervorgebrachte Spectrum auf ein mit Chlorsilber überzogenes Papier fallen. Es zeigte sich nun, daß die rothen Strahlen fast gar keine Wirkung, die blauen eine merkliche, die violeten aber die stärkste Wirkung auf das Chlorsilber hervorbrachten. Selbst über die violeten Strahlen hinaus fand noch eine Wirkung statt. Berard concentrirte hierauf durch eine Linse alle Strahlen vom Grün bis zum äußersten Violet und durch eine zweite Linse einen Theil der grünen, die gelben und rothen Strahlen. Im Brennpunkte der letzteren Linse war die Lichtstärke am größten, die chemische Wirksamkeit aber am schwächsten, während im Vereinigungspunkte der übrigen Strahlen das Gegentheil beobachtet wurde. Dieser Versuch zeigt zugleich, daß die chemische Wirkung des Lichts nicht allein auf den Einfluß der Wärme zurückgeführt werden kann, da im Vereinigungspunkte der gelben und rothen Strahlen gerade die intensivste Wärme vorkommt. Doch können die letzterwähnten Strahlen die Wirkung fortsetzen, welche die blauen und violeten begonnen haben, wie E. Becquerel am Bromsilberpapiere entdeckt hat.

87. Eine interessante Anwendung der chemischen Wirksamkeit des Lichts ist die Fixirung der Bilder in der Camera obscura oder die sogenannte Photographie. Schon Davy versuchte die Bilder

Digitized by Google

kleiner Gegenstände vermittelst des Sonnenmikroskopes auf Chlorsilberpapier darzustellen, aber wegen der fortdauernden Einwirkung des Lichts waren sie nur von sehr kurzer Dauer. Später brachte Niepce dauernde Bilder auf Platten von Glas, Stein oder Silber in der Camera obscura hervor, indem er dabei die Einwirkung des Lichts auf eine dünne Schicht von Judenpech und Lavendelöl benutzte. Das vollkommenste Verfahren ist aber jetzt das von Daguerre erfundene.

Eine mit einer dünnen Silberschicht überzogene Kupferplatte wird zuerst durch Oel und fein geschlemmten Tripel, indem man sich dabei feiner Baumwolle bedient, und dann abwechselnd mit sehr verdünnter Salpetersäure und Tripel sorgfältigst gereinigt. Darauf legt man sie auf eine viereckige Porzellanschale, worin sich eine wässerige Lösung von Chlorjod befindet. Hier bleibt sie den Dämpfen des Jods so lange ausgesetzt, bis sich auf ihrer Fläche eine tiefgoldgelbe Schicht von Jodsilber gebildet hat. Dann wird die Platte, vor jeder fremdartigen Einwirkung des Lichts geschützt, in die Camera obscura an die Stelle gebracht, wo sich ein scharfes Bild des Gegenstandes erzeugt. Nach einer gewissen Zeit, die durch die Intensität des vom Gegenstande kommenden Lichts, durch die Brennweite der Linse und noch durch andere Umstände bedingt ist, nimmt man die Platte aus der Camera obscura heraus. Noch ist kein Bild sichtbar; setzt man aber die Platte den Dämpfen von Quecksilber aus, welches bis zu 76° erwärmt ist, so tritt es hervor. Wenn es auf diese Weise die gehörige Schärfe erlangt hat, wird die Platte in eine Lösung von unterschwefligsaurem Natron oder in eine kochend heiße Lösung von Kochsalz getaucht, wodurch der noch vorhandene Ueberzug von Jodsilber aufgelöst wird. Eine fernere Einwirkung des Lichts kann dann nicht mehr stattfinden. Um das Bild zu vollenden, spült man noch die Fläche mit heißem destillirten Wasser ab. An denjenigen Stellen der Platte nun, wo die Einwirkung des Lichts am stärksten gewesen ist, haben sich die Quecksilberdämpfe als außerordentlich feine Perlen niedergeschlagen, während dies an den anderen Stellen nicht so der Fall sein konnte. Die Quecksilberkügelchen zerstreuen das Licht nach allen Richtungen, wodurch die hellen Parthieen des Bildes entstehen, wenn man die Platte so hält, daß die in der Einfallsebene des Tageslichts reflectirten Strahlen das Auge nicht treffen oder daß in das letztere nur die von dunkelen Gegenständen kommenden Strahlen gelangen können. Die Silberfläche selbst bildet den dunkelen Grund, insofern sie nur nach einer, nicht aber nach allen Richtungen das einfallende Licht reflectirt, und zwar um so mehr, je feiner ihre Politur ist.

Digitized by Google

Uebrigens ist das Daguerre'sche Verfahren schon einigen Verbesserungen unterworfen worden. So wird die Zeit der Lichteinwirkung bedeutend abgekürzt, wenn man nach Kratochwila einer Jodlösung in Weingeist etwas Brom zusetzt oder auch, wenn man Chlorjod in Wasser auflöst. Die Platte wird dadurch viel empfindlicher gegen das Licht. Die Gebrüder Natterer gebrauchten mit Vortheil eine Platte, welche zuerst mit einer gelben Jodschicht überzogen und dann so lange über Chlorwasser gehalten wurde, bis sie röthlich erschien. Auch kann man das unveränderte Jodsilber durch eine kalte Kochsalzlösung wegschaffen, wenn man die hineingetauchte Platte nach Draper mit einem Zinkstäbchen berührt. —

Ein anderes Verfahren zur Darstellung der Lichtbilder ist das Talbot'sche. Man bereitet eine Lösung von 5 Grammen salpetersauren Silberoxyds in 110 Gr. destillirten Wassers, bestreicht damit gutes Schreibpapier und läßt es trocknen. Alsdann taucht man das Papier in eine Lösung von 30 Gr. Jodkalium und 270 Gr. destillirten Wassers, zieht es durch gewöhnliches Wasser und läßt es von Neuem trocknen. Das so zubereitete Papier muß vor dem Lichte geschützt aufbewahrt werden. Wenn man es gebrauchen will, wird es mit einer Mischung bestrichen, die aus gleichen Mengen zweier Flüssigkeiten besteht. Die eine ist eine Lösung von 5 Gr. salpetersauren Silberoxyds und 50 Gr. Wasser mit einem Zusatze von 1/6 concentrirter Essigsäure. Die zweite ist eine gesättigte Lösung von Gallussäure. Nach dieser Behandlung nennt Talbot das Papier ein kalotypes. Dasselbe wird noch feucht in die Camera obscura gebracht und nach etwa 1 Minute wieder herausgenommen. Das Bild, von dem man jetzt noch wenig oder gar nichts bemerkt, tritt deutlich hervor, wenn man das Papier noch einmal mit jener Mischung bestreicht und etwas erwärmt. Dieses Bild ist aber ein negatives, d. h. den hellen Stellen des Gegenstandes entsprechen die dunkelen Stellen des Bildes und umgekehrt. Um es zu fixiren, wird es mit einer Lösung von 3 Gr. Bromkalium in 120 Gr. Wasser befeuchtet und nach einigen Minuten abgewaschen. Das positive Bild erhält man, wenn man das negative auf ein ganz ähnlich zubereitetes Papier zwischen zwei Glasplatten legt und es nochmals dem Sonnenlichte aussetzt. Die dunkelen Stellen des Bildes halten dann das Licht von dem zweiten Papiere ab, so daß es nur durch die hellen hindurch wirken kann. Auf diese Weise entsteht auf dem zweiten Papiere das positive Bild.

Nach diesem Verfahren ist es schwieriger, eben so reine und feine Bilder darzustellen als nach der Methode Daguerre's.

Digitized by Google

Aber auch die letztere kann wegen der ungleichen Wirksamkeit der verschiedenen Farbestrahlen das richtige Verhältniß zwischen Licht und Schatten niemals ganz naturgetreu wiedergeben, obschon ihre Bilder in Hinsicht auf Schärfe und Feinheit volle Bewunderung verdienen.

88. Moser hat eine Reihe interessanter Erscheinungen entdeckt, welche er zum Theil der Wirkung eines unsichtbaren Lichts zuschreibt, das zwar nicht im Stande ist, unser Sehorgan zu afficiren, aber doch sein Dasein durch gewisse Veränderungen bekundet, welche es auf der Oberfläche der Körper hervorbringt.

Legt man auf eine polirte Platte von Glas, Metall, Holz u. dgl., z. B. auf eine Silberplatte, einen gravirten Stempel, so sieht man, wenn man nach einiger Zeit den Stempel wegnimmt und die Platte behaucht oder Queckſilberdämpfen aussetzt, das Bild des Stempels. Dasselbe zeigt sich auch, wenn man den gravirten Stempel eine Zeitlang im Finstern auf der Platte liegen läßt und diese nachher behaucht.

Eine gewisse Aehnlichkeit dieser Erscheinung mit der Wirkung des Lichts auf Daguerre'sche Platten ist nicht zu verkennen. Auch ist das erwähnte unsichtbare Licht an sich nicht unwahrscheinlich, weder nach der Emanations- noch nach der Vibrationstheorie, d. h. es ist wahrscheinlich, daß jeder Körper bis zu einem gewissen Grade selbstleuchtend ist, wenn auch die ausgesendeten Strahlen in unserem Auge keine merkliche Wirkung hervorbringen können. Ob aber die obige Erscheinung und andere ähnliche Erscheinungen Wirkungen dieses Lichtes sind, ist mit Grund zu bezweifeln. Waidele giebt davon eine sehr einfache Erklärung.

Alle Körper absorbiren nämlich mehr oder weniger Gase, in der Art, daß man sich jeden Körper von verschiedenen mehr oder weniger dichten Gasatmosphären eingehüllt denken kann. Durch Erhöhung der Temperatur oder durch Ausglühen verliert der Körper die absorbirten Gase und muß daher besonders geschickt sein, Dämpfe, mit denen er nun in Berührung kommt, zu condensiren. Aehnliches wird stattfinden, wenn man z. B. eine Silberplatte mit frisch geglühtem Tripel polirt und reinigt. Gerathen zwei Körper mit einander in Berührung, so muß ein Uebergang der absorbirten Gase von dem einen zum anderen stattfinden, und man sieht ein, daß ein frisch gereinigter Körper die Gase stärker an seiner Oberfläche verdichten kann als ein solcher, welcher schon mit einer Gasschicht bedeckt ist. Dies muß nun auch der Fall sein, wenn man einen Stempel auf eine Platte setzt, insofern die Oberflächen beider Körper nicht gleich rein sind. An der

Digitized by Google

Berührungsstelle werden sich die Gase je nach den Umständen mehr oder weniger stark als an anderen Stellen verdichten, und wenn man nachher die Platte behaucht, so werden sich auch hier die Dämpfe schwächer oder stärker condensiren. Daher das Bild des Stempels.

Zur Bestätigung des eben Gesagten brachte Waidele auf die eine Hälfte einer mit frisch geglühtem Tripel geputzten Silberplatte frisch ausgeglühtes Kohlenpulver, auf die andere Hälfte aber solches Kohlenpulver, durch welches ein Strom von Kohlensäure geleitet war. Nach einigen Minuten wurde sämmtliches Kohlenpulver mit reiner Baumwolle weggekehrt. Wenn man nun die Platte behauchte, so condensirte sich der Wasserdampf auf jener Hälfte mit bläulicher, auf dieser mit einer bräunlichen Färbung. Quecksilberdämpfe condensirten sich nur auf derjenigen Hälfte, auf welcher das frisch ausgeglühte Kohlenpulver gelegen hatte. Der Grund ist leicht einzusehen. Auf dieser Hälfte ist die Oberfläche der Platte noch bei Weitem reiner als auf der anderen Hälfte, wo das kohlensäurehaltige Pulver gelegen hat. Auf jener Hälfte müssen sich daher auch mehr Wasser- oder Quecksilberdämpfe verdichten als auf dieser Hälfte, welche schon mit einer dichten Schicht von Kohlensäure belegt ist.

Man lege einen Stahlstempel längere Zeit in Kohlenpulver, welches mit Kohlensäure gesättigt ist, und setze ihn dann auf eine ganz reine Platte. Nimmt man den Stempel nach einiger Zeit hinweg und setzt die Platte Quecksilberdämpfen aus, so verdichten sich diese besonders an denjenigen Stellen, welche nicht mit dem Stempel, der sich im Kohlenpulver mit einer Kohlensäureschicht bedeckt hatte, in Berührung waren. Es erscheint daher das Bild des Stempels. Setzt man dagegen den frisch gereinigten Stempel auf eine mit einer Gasschicht überzogene Platte, so werden die Quecksilberdämpfe nach Hinwegnahme des Stempels vorzugsweise da condensirt, wo der letztere und die Platte mit einander in Berührung waren. Es muß daher wieder auf der Platte das Bild des Stempels hervortreten. Sind aber Platte und Stempel ganz rein oder haben beide in Kohlenpulver gelegen, welches mit Kohlensäure gesättigt war, so gewahrt man kein Bild des Stempels.

Man lege auf irgend eine polirte Platte einen Papierschirm mit ausgeschnittenen Figuren, behauche die Platte und nehme hierauf den Schirm hinweg. Das Wasser verdunstet nun und nimmt einen großen Theil der Gasschicht, welche der Platte adhärirt, mit fort, während dies an den vom Schirme bedeckt gewesenen Stellen nicht der Fall ist. Behaucht man jetzt die Platte zum zweiten Male, so verdichten sich

Digitized by Google

die Wasserdämpfe vorzugsweise an jenen Stellen, welche von den absorbirten Gasen größtentheils befreit worden sind, wodurch das Bild der ausgeschnittenen Figuren zum Vorschein kommt. Besonders deutlich tritt dasselbe hervor, wenn man die Platte vorher absichtlich mit einer Schicht Kohlensäure oder Ammoniakgas bedeckt hat. Bei ganz reinen Platten erscheinen die Figuren undeutlich.

Moser ist nun der Meinung, daß die Dämpfe in dem Augenblicke, wo sie in die tropfbare Form übergehen, Licht entwickeln, das, vorher in den Dämpfen gebunden, nunmehr wirksam wird und jene Erscheinung hervorruft. Auch dieser Gedanke ist an sich nicht unwahrscheinlich, aber zur Erklärung der Erscheinung nicht nöthig, wie man aus dem Vorigen entnommen haben wird.

Wenn man mit einem Wassertropfen, welcher an einem Glasstäbchen hängt, über eine polirte Platte hinfährt, ohne sie gerade unmittelbar zu berühren, so werden beim nachherigen Behauchen der Platte die Züge sichtbar, indem der Tropfen auf seinem Wege einen Theil des Gases absorbirt, welches die Platte bedeckt. Nach demselben Principe lassen sich noch viele andere hierher gehörige Erscheinungen erklären.

89. Hinsichtlich der chemischen Erscheinungen des Lichts erinnern wir hier an das, was wir schon früher darüber gesagt haben. Dieselben setzen auf keinen Fall einen starken Gegensatz oder eine starke Verwandtschaft zwischen den Elementen des Aethers und denen der Materie voraus, wie denn überhaupt nur ein solcher Aether objectiver Grund der optischen Erscheinungen sein kann, welcher die Constitution der Materie nicht wesentlich zu verändern vermag, sondern sich vielmehr in seinem Verhalten nach dieser richtet. Das Licht begünstigt durch seine Vibrationen manche chemische Verbindungen und Trennungen und zwar um so mehr, je schneller sie vor sich gehen, da das violete Licht in dieser Hinsicht am wirksamsten ist. Arago hat auch nachgewiesen, daß an den Stellen, wo sich durch Interferenz die Wirkungen zweier Wellensysteme aufheben, keine Schwärzung des Chlorsilbers erfolgt.

Bei Gelegenheit der doppelten Brechung und Polarisation des Lichts haben wir gesehen, in welchem innigen Zusammenhange diese Erscheinungen mit der Krystallform der Körper stehen und daß sie uns selbst über die innere Structur der Körper bis zu einem gewissen Grade Aufschlüsse geben können. Auch feinere materielle Unterschiede mancher Stoffe hat man aus ihren optischen Eigenschaften erkannt, obgleich sie der chemischen Analyse eine Zeitlang entgangen waren.

Digitized by Google

Aus den vorhergehenden Kapiteln wird man die Ueberzeugung gewonnen haben, daß die Vibrationstheorie wohl geeignet ist, die optischen Erscheinungen in einen durchgreifenden Zusammenhang zu bringen, so daß selbst Manches, was anfänglich als willkürliche Annahme erschien, später bis zu einem gewissen Grade den Charakter der Nothwendigkeit erhielt. Dabei ist diese Theorie sehr empfänglich für die mathematische Analyse, wodurch es möglich wird, sie auf die allgemeinen Bewegungsgesetze der Theilchen eines elastischen Mediums zurückzuführen. Die Einwürfe aber, welche sich bis jetzt gegen diese Theorie erhoben haben, sind nicht von der Art, daß sie dieselbe im Wesentlichen gefährden könnten.

Digitized by Google

Zweiter Abschnitt.

Von der Wärme.

Erstes Kapitel.

Ausdehnung der Körper durch die Wärme.

90. Mit dem Lichte gleichzeitig erscheint in der Regel auch dasjenige, was wir Wärme nennen. Dieselbe offenbart sich zunächst durch eine besondere Affection unseres Gefühlsvermögens. Wie das Licht, so geht auch die Wärme nur von der Materie aus, mögen wir uns nun mit der letzteren in Berührung befinden oder nicht. Aber nicht unmittelbar können wir jene Empfindung der Substanz der Körper zuschreiben, sondern es muß in und außer ihnen etwas Selbstständiges vorhanden sein, was dieser Wirkung zu Grunde liegt. Damit stimmen auch alle anderen Erscheinungen der Wärme überein, welche wir noch kennen lernen werden.

Alle Körper erleiden durch die Wärme eine Veränderung ihres Volumens, sie werden ausgedehnt, und die Größe der Ausdehnung eines Körpers steht im genauen Zusammenhange mit der Größe seiner Erwärmung, so daß sich jene benutzen läßt, um diese zu bestimmen. Auch diese Ausdehnung setzt etwas von den Elementen der Körper Unabhängiges voraus. Man nennt die Temperatur eines Körpers den Grad seiner Erwärmung, und das Instrument, welches zum Messen der Temperatur dient, Thermometer.

91. Das Quecksilberthermometer, eine mit Quecksilber gefüllte Glasröhre, hat folgende Gestalt. Erwärmt man die Kugel desselben, so dehnt sich das Quecksilber aus, indem es in der Röhre aufsteigt; das Gegentheil zeigt sich beim Erkalten der Kugel. Auf diese Weise

Digitized by Google

läßt ſich ſchon das ſogenannte Steigen und Fallen der Temperatur im Allgemeinen nachweiſen; will man aber die Temperaturen durch Zahlen ausdrücken, wie dies zum Behufe einer genauen Vergleichung derſelben nöthig iſt, ſo muß die Röhre auf eine gewiſſe Weiſe eingetheilt oder graduirt werden.

Um ein gutes Thermometer zu conſtruiren, hat man zunächſt für eine vollkommen cylindriſche Röhre Sorge zu tragen. Um die letztere in dieſer Hinſicht zu prüfen, bringt man in dieſelbe ein kleines Queckſilberſäulchen, deſſen Länge man an verſchiedenen Stellen der Röhre mit Hilfe eines Maßſtabes mißt. Bleibt nun das Säulchen an allen Stellen gleich lang, ſo iſt die Röhre cylindriſch, im Gegentheile aber nicht. Nachdem man ſich ſo von der vollkommen cylindriſchen Form der Röhre überzeugt hat, bläſt man eine Kugel an und füllt die Röhre mit Queckſilber. Das letztere geſchieht auf die Weiſe, daß man die Kugel erwärmt, um die darin befindliche Luft auszudehnen, und darauf die Spitze der Röhre raſch in ein Gefäß mit Queckſilber taucht. Während des Erkaltens der Kugel ſteigt das Queckſilber in die Röhre und auch zum Theil in die Kugel. Man kehrt dann die Röhre um und erhitzt die Kugel von Neuem, bis die Flüſſigkeit in's Kochen geräth. Die Queckſilberdämpfe werden den ganzen Raum der Röhre ausfüllen und die Luft vollſtändig austreiben, ſo daß ſich nun die Kugel, wenn man das offene Ende der Röhre wieder raſch in jenes Gefäß taucht, völlig mit Queckſilber füllen wird. Wenn die Queckſilberſäule in der Röhre die gehörige Länge hat, ſo zieht man die Röhre in eine feine Spitze aus, erwärmt die Kugel über Kohlenfeuer ſo, daß noch einige Queckſilbertröpfchen aus der Spitze hervortreten, und ſchmilzt die letztere mittelſt einer Löthrohrflamme zu. Anſtatt den Raum über der Queckſilberſäule luftleer zu machen, kann man aber auch noch etwas Luft darin laſſen. Sobald nämlich die Kugel die Temperatur der umgebenden Luft angenommen hat, ſchmilzt man die Spitze zu und macht ſie rothglühend, ſo daß das Glas hier dem Schmelzen ſehr nahe kommt. Erwärmt man hierauf raſch die Kugel, ſo ſteigt das Queckſilber und treibt die Luft gegen die erweichte Spitze hin. Hierdurch entſteht ein mehr oder weniger großer Raum, in den die Luft ſtets zurückgetrieben wird, wenn das Queckſilber ſteigt.

Wenn das Thermometer ſo weit fertig iſt, muß es mit einer Scale verſehen werden, indem man an der Röhre zwei feſte Punkte beſtimmt und den Zwiſchenraum in eine gewiſſe Anzahl gleicher Theile theilt. Zu dieſen feſten Punkten wählt man gewöhnlich den Gefrier- und den

Digitized by Google

Siedepunkt des Waſſers. Der Gefrierpunkt läßt ſich leicht beſtimmen, wenn man die Thermometerröhre in ein Gefäß mit fein geſtoßenem Eiſe ſteckt und ſo lange darin läßt, bis ſich die Länge der Queckſilberſäule nicht mehr ändert. Den Punkt der Röhre, welcher in dieſem Falle dem Gipfel der Säule entſpricht, markirt man vermittelſt eines Diamanten. Zur Beſtimmung des Siedepunktes gebraucht man ein Gefäß mit langem Halſe, an dem ſich oben zwei Seitenöffnungen befinden. Daſſelbe wird zum Theil mit deſtillirtem Waſſer gefüllt und dann das Thermometer ſo eingeſenkt, daß es die oberſte Schicht des Waſſers eben berührt. Bringt man nun das deſtillirte Waſſer zum Kochen, ſo werden ſich allmälig alle Theile des Gefäßes gleichmäßig erwärmen und die Waſſerdämpfe, welche das Thermometer allenthalben umgeben und oben durch die Seitenöffnungen entweichen, haben mit der oberſten Waſſerſchicht eine gleiche Temperatur. Sobald die Queckſilberſäule einen feſten Stand angenommen hat, bezeichnet man ihren höchſten Punkt auf die oben angegebene Weiſe. Wir werden ſpäter ſehen, daß ſich der Siedepunkt mit dem Luftdrucke ändert; je größer der letztere, deſto höher liegt der Siedepunkt. Man muß daher den letzteren bei einem gewiſſen Barometerſtande beſtimmen, für welchen man den mittleren Barometerſtand am Niveau des Meeres, nämlich 28 Pariſer Zoll, gewählt hat. Iſt aber der Barometerſtand zur Zeit der Beſtimmung des Siedepunktes ein anderer, ſo muß man ihn auf den eben angeführten reduciren.

Man hat die Erfahrung gemacht, daß der Eis- oder Nullpunkt bei vielen Thermometern, namentlich bei ſolchen, in denen ſich oberhalb des Queckſilbers ein luftleerer Raum befindet, mit der Zeit ſteigt, ſo als ob die Kugel kleiner geworden wäre. Es rührt dies vom Drucke der äußeren Luft her, welcher die Kugel bis zu einem gewiſſen Grade zuſammenpreßt. Man hält es daher auch für rathſam, die zugeſchmolzenen Thermometerröhren erſt einige Monate liegen zu laſſen, bevor man ſie graduirt, und auch nachher noch den Eispunkt von Zeit zu Zeit zu prüfen.

Theilt man den Abſtand zwiſchen dem Null- und Siedepunkte in 100 gleiche Theile (Grade), ſo erhält man ein ſogenanntes hundertheiliges Thermometer nach Celſius, welches bei wiſſenſchaftlichen Unterſuchungen faſt durchgängig im Gebrauche iſt. Außerdem bedient man ſich noch der Reaumur'ſchen und Fahrenheit'ſchen Scale, von denen die letztere namentlich in England ſehr häufig vorkommt. Bei der erſteren iſt der Abſtand zwiſchen den beiden feſten Punkten in 80 Grade getheilt. Demnach iſt 100° C. — 80° R. und 1° C. —

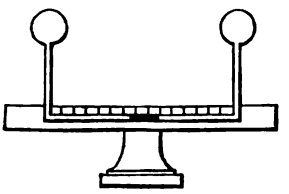
Digitized by Google

0,8° R. und 1° R. = 1,25° C. Will man alſo Reaumur'ſche Grade in Celſius'ſche verwandeln, ſo braucht man nur die Zahl der erſteren mit 1,25 zu multipliciren; ſind aber umgekehrt Celſius'ſche in Reaumur'ſche zu verwandeln, ſo multiplicirt man jene mit 0,8. Bei der Fahrenheit'ſchen Scale iſt der Nullpunkt mit 32, der Siedepunkt des Waſſers mit 212 bezeichnet, ſo daß der Abſtand zwiſchen beiden in 180 gleiche Theile getheilt iſt. Der Nullpunkt dieſer Scale entſpricht dem Theilſtriche — 17,7 der Celſius'ſchen Scale. Dieſe Temperatur wird erhalten durch Miſchung von 1 Theil Kochſalz mit 3 Theilen Schnee. Man hat nun 180° F. — 100° C. und 1° F. = $^5/_9$° C., 1° C. — $^9/_5$° F. Da aber die Nullpunkte beider Scalen nicht zuſammenfallen, ſo muß man, um die Fahrenheit'ſchen Grade in Celſius'ſche zu verwandeln, von der Zahl der erſteren die Zahl 32 abziehen und den Reſt mit $^5/_9$ multipliciren, ſo daß man allgemein hat C. — $^5/_9$ (F. — 32). Zur Verwandlung der Celſius'ſchen Grade in Fahrenheit'ſche hat man jene mit $^9/_5$ zu multipliciren und zum Product 32 zu addiren; dies giebt F. — $^9/_5$ C. + 32.

Die Angaben des Queckſilberthermometers ſind richtig bis zu 360° oberhalb und bis zu — 35° unterhalb des Nullpunktes. Ueber dieſen Punkt hinaus nimmt das Thermometer einen unregelmäßigen Gang an, weil die Ausdehnung des Queckſilbers, wie aller Körper, in der Nähe des Gefrier- und Siedepunktes unregelmäßig wird.

Zur Beſtimmung ſehr niedriger Temperaturgrade kann man ſich eines Weingeiſtthermometers bedienen, welches auf ähnliche Weiſe wie das vorige eingerichtet wird. Unterhalb des Nullpunktes befolgt das Weingeiſtthermometer einen ſehr regelmäßigen Gang, was nicht ſo oberhalb deſſelben der Fall iſt, da der Weingeiſt ſchon unter 100° ſiedet. Die Angaben des Weingeiſtthermometers laſſen ſich leicht mit Hilfe einer Tabelle auf die des Queckſilberthermometers zurückführen.

Zur Meſſung feiner Temperaturunterſchiede gebraucht man die Differentialthermometer. Das Rumford'ſche beſteht aus einer Glasröhre, welche rechtwinklig umgebogen und an den Enden mit Kugeln verſehen iſt. Die Röhre enthält eine kleine Säule von Alkohol oder Schwefelſäure, welche mit etwas Karmin gefärbt iſt. Gegen dieſes Säulchen drückt die Luft in den Kugeln von entgegengeſetzten Seiten her. So lange der Druck auf beiden Seiten derſelbe iſt, nimmt die Säule eine beſtimmte Stelle ein, welche als Nullpunkt der Thei-



Digitized by Google

lung dient. In diesem Falle haben beide Kugeln einerlei Temperatur. Ist aber die Temperatur der einen Kugel höher als die der anderen, so bewegt sich die Säule gegen die kältere Kugel hin und die Entfernung des Säulchens vom Nullpunkte ist der Temperaturdifferenz beider Kugeln proportional. Bei Leslie's Differentialthermometer sind die verticalen Arme der Röhre länger, die Flüssigkeitssäule nimmt einen größeren Raum ein und die Theilung befindet sich an den verticalen Schenkeln der Röhre.

Später werden wir Melloni's Thermomultiplicator kennen lernen, welcher diese Apparate noch an Empfindlichkeit übertrifft.

Um hohe Hitzgrade zu bestimmen, wendet man sogenannte Pyrometer an.

Das Pyrometer von Wedgewood beruht auf der Eigenschaft des Thones, sich in der Hitze zusammenziehen, weil er darin sein Wasser abgeben muß. Je größer die Hitze, desto stärker ist die Zusammenziehung. Der Thon wird zu kleinen Cylindern geformt und einer davon an den Ort gebracht, dessen Temperatur ermittelt werden soll. Nachdem er wieder erkaltet ist, bringt man ihn zwischen zwei, unter einem sehr spitzen Winkel geneigte Lineale, welche mit einer Theilung versehen sind. Die Temperatur war um so höher, je tiefer der Cylinder zwischen denselben hinabsinkt. Zu diesen Cylindern nimmt man Thon aus Cornwallis, der mit etwas reiner Thonerde vermischt wird. Schon gebrauchte Cylinder werden für höhere Temperaturen benutzt. Uebrigens ist dieses Pyrometer beinahe ganz außer Gebrauch, da es nur sehr wenig zuverlässige Resultate giebt.

Daniell's Pyrometer gründet sich auf die ungleiche Ausdehnung des Platins und des Graphits. Aus Reißblei, einer Mischung von reinem Graphit und Thon, wird ein Cylinder gebildet und dieser zum Theil ausgebohrt. Eine Platinstange, welche auf dem Boden der Höhlung ruht, schiebt während der Erhitzung einen gegen die innere Wand der Höhlung geklemmten Porcellancylinder in die Höhe, weil das Platin sich stärker ausdehnt als das Reißblei. Das Emporheben des Porcellancylinders ist natürlich um so bedeutender, je stärker der Hitzegrad ist, je mehr sich also das Platin ausgedehnt hat. Auch dieses Pyrometer gewährt wegen der ungleichen Beschaffenheit des Reißbleies keine zuverlässigen Resultate.

Das Luftpyrometer besteht im Wesentlichen aus einem sphäroidischen, hohlen Körper von Platin, welcher in eine feine Spitze ausläuft. Aus der letzteren entweicht die Luft während der Erhitzung und man kann aus der verschwundenen Luftmenge nach der

Digitized by Google

Erkaltung die Temperatur berechnen, welche das Instrument angenommen hatte.

Um die höchste und niedrigste Temperatur zu bestimmen, welche die Luft an irgend einem Orte während einer gewissen Zeit erlangt hat, läßt sich Rutherford's Maximum- und Minimumthermometer gebrauchen. Dasselbe besteht aus zwei horizontal liegenden Thermometern, die an einer und derselben Fassung befestigt sind; das eine ist ein Quecksilber-, das andere ein Weingeistthermometer. In der Röhre des ersteren liegt ein Stahlstiftchen, welches die Quecksilbersäule vor sich hintreibt, wenn sie sich durch die Wärme ausdehnt. Beim Erkalten zieht sich das Quecksilber zurück, während das Stäbchen an der Stelle liegen bleibt, bis zu der es beim höchsten Stande des Thermometers geschoben worden war. Auf diese Weise erfährt man also das Maximum der Temperatur innerhalb einer gewissen Zeit. Im Weingeiste des anderen Thermometers befindet sich aber ein Glasstäbchen, welches von der Flüssigkeit nach der Kugel der Röhre hin mit fortgenommen wird, wenn sich jene beim Sinken der Temperatur zusammenzieht. Nimmt die Wärme wieder zu, so dehnt sich die Weingeistsäule aus und geht an den Seiten des Stäbchens vorbei, während dieses an der Stelle, welche dem Minimum der Temperatur entspricht, liegen bleibt. Um die beiden Stäbchen nach der Beobachtung durch eine Neigung des Apparates wieder leicht an ihren anfänglichen Ort bringen zu können, haben beide Thermometer eine entgegengesetzte Lage zu einander, so daß die Kugel des einen Thermometers rechts, die des anderen links liegt.

92. Bei festen Körpern, welche sich nach allen Richtungen gleichmäßig ausdehnen, bestimmt man zunächst die Längenausdehnung, welche durch eine gewisse Temperaturerhöhung, etwa von 0° bis 100°, hervorgebracht wird. Kennt man die Länge eines Körpers bei 0° und bestimmt man hierauf, nachdem der Körper bis 100° erwärmt ist, seine Länge von Neuem, so ergiebt sich aus dem Unterschiede dieser beiden Längen die Größe der linearen Ausdehnung. Dividirt man aber die so erhaltene Größe der Ausdehnung durch die ursprüngliche Länge des Körpers, so erhält man den sogenannten Ausdehnungscoefficienten, welcher anzeigt, um den wievielten Theil seiner Länge bei 0° sich ein fester Körper ausdehnt, wenn seine Temperatur auf 100° erhöht wird. Bei jedem festen Körper findet man einen eigenthümlichen Ausdehnungscoefficienten.

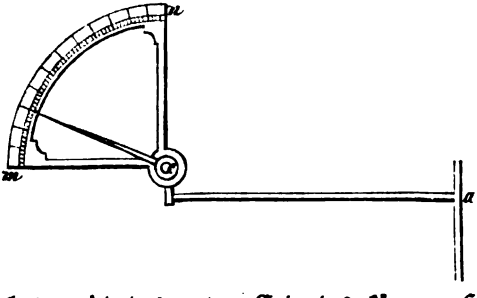
Die Erfahrung lehrt nun, daß die Ausdehnung der meisten festen Körper von 0° bis 100° der Zunahme der Temperatur proportional

Digitized by Google

oder, was daſſelbe iſt, daß ſie ſich innerhalb dieſer Grenzen gleichförmig ausdehnen. Dies vorausgeſetzt läßt ſich ohne Weiteres die Größe der Längenausdehnung beſtimmen, welche die Temperaturerhöhung eines Körpers von 0° bis 100° hervorbringt, wenn man die Längenausdehnung für das Steigen der Temperatur von 0° bis 100° durch die letztere Zahl dividirt.

Aus der linearen Ausdehnung kann man nun leicht die cubiſche Ausdehnung oder die Vergrößerung berechnen, welche der Rauminhalt des Körpers durch eine Temperaturerhöhung erleidet. Iſt a die Seite eines Würfels bei 0°, ſo iſt ſein Volumen $v = a^3$. Wenn man nun den Würfel auf 100° erwärmt, ſo wird jede ſeiner Seiten $= a + ae = a(1 + e)$, falls e den linearen Ausdehnungscoefficienten bezeichnet, und das Volumen v' des ausgedehnten Würfels $v' = a^3 (1 + e)^3 = a^3 (1 + 3e + 3e^2 + e^3)$. Wegen der Kleinheit der Größe e kann man ihre höheren Potenzen vernachläſſigen und man hat daher noch $v' = a^3 (1 + 3e) = v (1 + 3e)$. Aus dieſer Formel erſieht man, daß das Volumen des Würfels bei 0° durch die Temperaturerhöhung um 3ev zugenommen hat, ſo daß 3e der Ausdehnungscoefficient des körperlichen Inhaltes iſt. Man braucht alſo nur den Coefficienten für die lineare Ausdehnung mit der Zahl 3 zu multipliciren, um den Coefficienten der cubiſchen Ausdehnung zu erhalten.

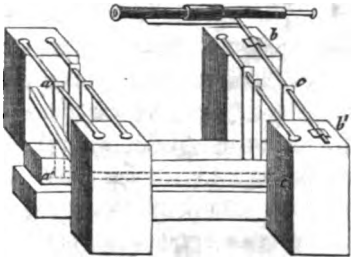
93. Um die Längenausdehnung eines feſten Körpers zu beſtimmen, bedient man ſich am einfachſten des Apparates, den die nebenſtehende Figur darſtellt. Das eine Ende des zu unterſuchenden Körpers ſtemmt ſich bei a gegen eine feſte Widerlage, das andere aber gegen den kürzeren Arm eines Winkelhebels, welcher um den Punkt c drehbar iſt. Sobald ſich nun der Körper durch die Erwärmung ausdehnt, wird das untere Ende des kürzeren Hebelarmes etwas fortgeſchoben und dadurch auch das Ende des längeren Hebelarmes zu einer Bewegung auf der Scale veranlaßt. Der Weg, welchen der längere Hebelarm auf der Scale zurücklegt, iſt bedeutend größer als die Verſchiebung des kürzeren Arms, und wenn jener Arm im Verhältniſſe zu dieſem eine hinreichende Länge hat, ſo kann man auf dieſe Weiſe



Digitized by Google

auch die kleinſte Verlängerung des Körpers ſichtbar machen. Soll aber dieſer Apparat genaue Reſultate geben, ſo müſſen die feſte Widerlage und die Drehungsaxe des Hebels während des Verſuchs unverrückt bleiben, was ſchwer zu erreichen iſt. Dieſer Uebelſtand fällt weg bei einem Apparate, welcher von Lavoiſier und Laplace zur Beſtimmung der Ausdehnung feſter Körper gebraucht wurde.

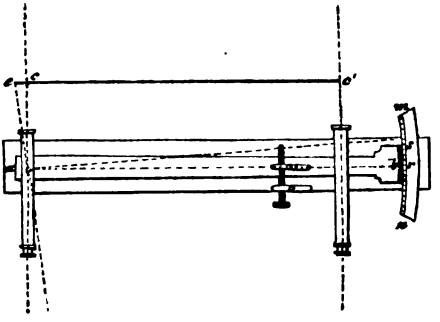
Hier ſind vier maſſive Pfeiler von Stein in die Erde eingeſenkt; zwiſchen ihnen befindet ſich ein mit Waſſer oder Oel gefüllter Kaſten, in den der zu prüfende Gegenſtand horizontal auf gläſerne Stäbe gelegt wird. An einem eiſernen Querſtab, welcher mit ſeinen Enden in die beiden gegenüberſtehenden Pfeiler eingekittet iſt, hängt vertical ein Glasſtab aa′ herab, gegen den ſich das eine Ende des Stabes ſtützt, während das andere Ende in naher Berührung mit einem ähnlichen Glasſtabe cc′ iſt, der von einem um ſeine Axe leicht drehbaren Stabe bb′ getragen wird. An der Verlängerung dieſer Stange ſieht man ein Fernrohr, welches auf eine entfernte Scale gerichtet iſt. Wenn man nun das Waſſer im Kaſten erhitzt, ſo wird das Ende der Stange cc′ durch die Ausdehnung des Stabes a′c′ verrückt, wodurch das Fernrohr eine Drehung erleidet, die man an der entfernten Scale ableſen kann. Man ſieht leicht, daß hier die Drehungsaxe während der Verrückung der Stange ihre Lage unverändert beibehält. Kennt man die Länge der Stange und die Entfernung der Scale vom Fernrohre, ſo läßt ſich leicht die Größe der Ausdehnung beſtimmen. Wenn die Scale die gehörige Entfernung vom Fernrohre hat, ſo kann man auf dieſe Weiſe die geringſte Ausdehnung des Stabes bemerklich machen.



Uebrigens erſtreckt ſich die Anwendbarkeit dieſes Apparates nur bis zu 300°. Der folgende Apparat, welchen Pouillet in Anwendung brachte, iſt für höhere Temperaturgrade geeignet und kann auch zur Vergleichung von Längenmaßen zweckmäßig gebraucht werden.

Auf einer ſtarken Platte von Eiſen iſt eine Alhidade ab befeſtigt, welche 1 bis 1,2 Meter lang und um den Punkt a drehbar iſt; ſie trägt ein Fernrohr von kurzer Brennweite. Ein anderes Fernrohr iſt auf der Platte ſelbſt dergeſtalt befeſtigt, daß es die Drehung der Alhidade weiter nicht hindert; cc′ iſt der zu unterſuchende Stab,

Digitized by Google



welcher so vor den Fernröhren angebracht wird, daß seine Endpunkte c und c′ gerade in das Fadenkreuz fallen. Man trifft nun die Einrichtung so, daß der Punkt c′ unverrückt bleibt, während sich der Stab um c e ausdehnt. Um den Punkt e in das Fadenkreuz des Fernrohres zu bringen, muß sich die Alhidade um einen bestimmten Winkel drehen, wobei das Ende b auf der Theilung m n einen gewissen Bogen r s durchläuft. Man hat dann c e : r s = a c : a b, woraus sich leicht die Ausdehnung c e berechnen läßt, wenn das Verhältniß der Hebelarme a c und a b bekannt ist. Zur genaueren Bestimmung dieses Verhältnisses ist bei c rechtwinklig zur Visirlinie des beweglichen Fernrohres ein Metallplättchen angebracht, auf dem mit großer Genauigkeit 4 — 5 Millimeter gezogen sind. Während nun das Fadenkreuz des Fernrohres diese Abtheilung durchläuft, beobachtet man, wie viele Millimeter das Ende b der Alhidade auf seiner Theilung zurücklegt, woraus sich dann das Verhältniß der Hebelarme ergiebt. Um die Drehung der Alhidade genauer bestimmen zu können, ist bei b noch ein Nonius angebracht, den man mittelst einer Loupe abliest.

Will man nun die Ausdehnung für hohe Temperaturen beobachten, so bringt man den Stab auf einer Unterlage von Eisen in einen Ofen von Backsteinen, durch welchen man die heiße Luft oder auch die Flamme selbst streichen läßt. Den Fernröhren gegenüber befinden sich zwei Löcher, welche im Moment der Beobachtung geöffnet werden. So lange die Temperatur des zu untersuchenden Stabes noch unter der Rothglühhitze ist, muß man die Endpunkte desselben künstlich erleuchten, um darauf visiren zu können. Um aber die Ausdehnung für Temperaturen unter 300° mittelst dieses Apparates zu bestimmen, wendet man einen Kasten von Kupfer an, welcher auf einen Ofen gestellt und mit firem Oel gefüllt wird, das sich durch beständiges Rühren auf constanter Temperatur erhalten läßt. Der zu untersuchende Stab wird auf eine Unterlage von Eisen gelegt, welche auf einem Kasten ruht und durch ein Schraubensystem gehörig regulirt werden kann. Sorgt man nun dafür, daß das eine Ende des Stabes bei der

Digitized by Google

Beobachtung gerade in das Fadenkreuz des festen Fernrohres fällt, so läßt sich mit dem zweiten Fernrohre durch die Schraube leicht der Bewegung des anderen Endes nachfolgen.

Hat man einmal die lineare Ausdehnung bestimmt, so berechnet man nach dem Früheren leicht die cubische Ausdehnung.

In der folgenden Tabelle findet man die Längenausdehnung einiger festen Körper für eine Temperaturerhöhung von 0° bis 100° in Decimalbrüchen und in gewöhnlichen Brüchen ausgedrückt.

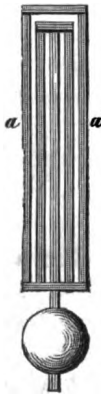
Namen der Körper.	Ausdehnung.	
Spiegelglas	0,00089089	1/1122
Englisches Flintglas	0,00081166	1/1248
Gußeisen	0,0011100	1/901
Stahl	0,00114450	1/874
Weiches Schmiedeeisen . . .	0,00122045	1/819
Stabeisen	0,00123504	1/812
Gold	0,00146606	1/682
Kupfer	0,00171220	1/584
Messing	0,00186760	1/535
Silber	0,00190868	1/524
Zinn	0,00193765	1/516
Blei	0,00284836	1/351
Zink	0,00294167	1/340
Eisendraht	0,00144010	1/694
Messingdraht	0,00193333	1/517
Antimon	0,0010833	1/923
Wismuth	0,00139167	1/719

94. Die Gewalt, mit der sich die Körper ausdehnen und wieder zusammenziehen, ist außerordentlich groß. Molard hat diese Kraft angewendet, um die stark ausgewichenen Mauern eines Magazins für Baumaterialien wieder in die normale Lage zu bringen. Starke eiserne Anker wurden durch die Mauer gezogen, vermittelst Lampen erhitzt und dann fortgeschoben. Indem sie sich nun beim Erkalten wieder verkürzten, brachten sie die erwähnte ungewöhnliche Wirkung hervor. Es erklärt sich auch daraus das Zerspringen des dicksten Glases und selbst starker eiserner Platten bei ungleicher Ausdehnung durch die Wärme. Eine Eisenstange, welche sich mit ihrem

Digitized by Google

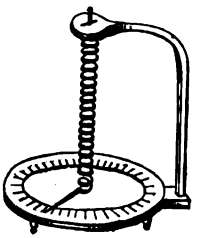
Enden gegen eine feste, unverrückbare Widerlage stützt, muß sich während der Ausdehnung durch die Wärme biegen. Sind aber die Enden der Stange dergestalt befestigt, daß sie sich beim Erkalten der letzteren nicht einander nähern können, so muß die Stange zerreißen.

Durch die ausdehnende Kraft der Wärme kommt in den Gang der Pendel eine Unregelmäßigkeit, da die Stangen bei höherer Temperatur länger sind als bei niedrigerer. Man wendet deshalb sogenannte Compensationspendel an, von denen die Figur eines der einfachsten darstellt. Zwei Eisenstangen a und a′ sind durch zwei eiserne Querstäbe mit einander verbunden. Auf dem untersten Querstabe stehen vertical zwei Stangen aus Zink, welche oben einen horizontalen Bügel tragen, an dem eine eiserne Stange mit der Linse des Pendels befestigt ist. Man sieht nun, daß die Linse durch die Ausdehnung der Pendelstange und der beiden Stangen a und a′ gesenkt, durch die Ausdehnung der Zinkstäbe aber gehoben wird. Ist also die Ausdehnung des Zinkes doppelt so groß als die des Eisens, so müssen sich diese Ausdehnungen in ihrer Wirkung auf den Pendel aufheben, d. h. die Pendellänge muß unverändert bleiben.



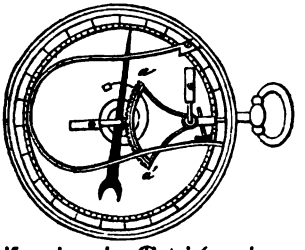
Verbindet man zwei Metallstreifen, welche sich durch die Wärme ungleich ausdehnen, wie Zink und Eisen, mit einander, so erhält man sogenannte Compensationsstreifen, welche bei der Construction der Unruhe in Chronometern gebraucht werden. Ein solcher Streifen bildet bei einer gewissen Temperatur eine gerade Linie, sobald aber die Wärme über diese Temperatur steigt, muß er sich dergestalt biegen, daß das Zink nach außen hin zu liegen kommt, weil sich dieses stärker als das Eisen ausdehnt. Bei geringerer Temperatur findet die Biegung im entgegengesetzten Sinne statt.

Auf der ungleichen Ausdehnung verschiedener Metalle durch die Wärme beruhen auch die Metallthermometer. Nebenstehende Figur zeigt ein sehr empfindliches Metallthermometer von Breguet. Zwei Streifen aus Platin und Silber sind mittelst eines Goldstreifens zusammengelöthet. Dem so erhaltenen Bande wird durch Strecken eine Dicke von $^1/_{100}$ Linie gegeben. Unten trägt das Band eine feine Nadel, welche mit ihrer Spitze eine Scale durchläuft. Wegen der geringen Masse des Bandes ist dieser Apparat sehr empfindlich.



Digitized by Google

Das sogenannte Quadrantenthermometer von Holzmann besteht aus einem kreisförmig gebogenen Streifen, welcher aus Kupfer und Stahl zusammengesetzt ist. Mit einem Ende ist er an das Gehäuse des Apparates befestigt, während sich das andere gegen einen Hebelarm stützt, dessen längerer Arm einen Rechen trägt. Die Zähne des Rechens



greifen in ein Getriebe ein, welches um eine Axe drehbar ist. An der letzteren befindet sich eine Nadel, deren Spitze auf einer Thermometerscale spielt. Erleidet nun der Streifen durch eine Temperaturveränderung eine stärkere Krümmung, so werden dadurch die Zähne in der Richtung von a nach a′ gedreht; bewegt sich aber der Streifen im entgegengesetzten Sinne, so wird durch eine um die Axe gewundene Spiralfeder eine rückgängige Bewegung des Zeigers hervorgebracht.

95. Unkrystallisirte Körper von gleichförmiger Dichtigkeit dehnen sich nach allen Richtungen gleichmäßig aus, was auch von Krystallen gilt, die in das reguläre System gehören. Andere Krystalle aber zeigen nach verschiedenen Richtungen auch eine verschiedene Ausdehnung, wie dies Mitscherlich zuerst nachgewiesen hat. So dehnen sich die einaxigen Krystalle in der Richtung der Axe in einem anderen Verhältnisse aus als nach jeder anderen Richtung; bei zweiaxigen Krystallen ist die Ausdehnung in der Richtung der kleinen Axe verhältnißmäßig größer als in der Richtung der großen Axe. Man kann sich davon überzeugen, wenn man die Flächenwinkel solcher Krystalle bei verschiedenen Temperaturen mißt. Die sogenannten Zwillingskrystalle des Gypses sind besonders zu Versuchen dieser Art geeignet. Schneidet man aus einem solchen Krystalle ein Stück heraus, so erscheinen die beiden Schnittflächen ganz eben und geben von einem entfernten Gegenstande nur ein Spiegelbild. Bei hinreichender Erhöhung der Temperatur erscheinen aber die Schnittflächen gebrochen und man erblickt zwei Bilder des Gegenstandes. Aus der Entfernung der beiden Bilder läßt sich der Winkel bestimmen, den die spiegelnden Flächen mit einander machen, woraus sich dann weiter das Gesetz der ungleichförmigen Ausdehnung ergiebt.

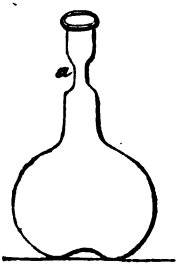
96. Tropfbare Flüssigkeiten dehnen sich im Allgemeinen viel stärker, aber weniger regelmäßig aus als feste Körper. Zur Bestimmung der Ausdehnung solcher Flüssigkeiten bedient man sich am einfachsten einer Thermometerröhre, welche mit einer verhältnißmäßig

Digitized by Google

großen Kugel versehen ist. Man füllt die Kugel des Apparates mit Queckſilber, ſo daß dieſes noch etwas in die Röhre hineinragt, kocht es über Kohlen etwas aus, um Luft und Feuchtigkeit zu entfernen, und beſtimmt dann das Gewicht des Apparates, woraus ſich auch leicht das Gewicht des eingefüllten Queckſilbers ergiebt. Den Punkt, bis zu welchem ſich das Queckſilber erhebt, bezeichnet man mit 0. Alsdann wäge man von der ſo eben beſtimmten Queckſilbermenge ein Zehntel genau ab und bringe es mit Beachtung der anfänglichen Temperatur in die Röhre. Bezeichnet man jetzt wieder den Stand des Queckſilbers, ſo beträgt der Inhalt zwiſchen dieſem Punkte und dem Nullpunkte gerade $^1/_{10}$ des Ganzen, und wenn die Entfernung beider Punkte in 100 gleiche Theile getheilt wird, ſo erhält man Tauſendtheile des Ganzen. Dieſes Inſtrument füllt man nun bei 0° mit der zu prüfenden Flüſſigkeit bis zum Nullpunkte und erwärmt es allmälig in einem Waſſer- oder Oelbade, alsdann erfährt man die Ausdehnung der Flüſſigkeit in Tauſendtheilen der Scale. Dabei muß aber noch nothwendiger Weiſe die Ausdehnung des Glasgefäßes ſelbſt in Rechnung gebracht werden.

Die Ausdehnung des Queckſilbers läßt ſich auf folgende Weiſe beſtimmen. Ein Gefäß von nebenſtehender Form wird in eine gekrümmte Spitze ausgezogen und mit Queckſilber von 0° gefüllt. Nachdem das Gewicht des letzteren beſtimmt iſt, erwärmt man den Apparat, wodurch ein Theil des ausgedehnten Queckſilbers ausfließen wird und zwar um ſo mehr, je höher die Temperatur ſteigt. Das Verhältniß des anfänglichen Gewichts zum Gewichte des im Gefäße zurückgebliebenen Queckſilbers giebt das Verhältniß an, in welchem ſich das Queckſilber durch die Temperaturerhöhung ausgedehnt hat.

Um nach dieſer Methode die Ausdehnung verſchiedener Flüſſigkeiten zu beſtimmen, iſt ein von Gay-Luſſac gebrauchtes Gefäß ſehr bequem. Das Gefäß hat einen engen Hals, welcher ſich oben trichterförmig erweitert. Die engſte Stelle des Halſes iſt genau bezeichnet. Man fülle das Gefäß mit der zu unterſuchenden Flüſſigkeit, erkalte es bis auf 0° und entferne alle Flüſſigkeit, welche ſich über dem erwähnten Punkte des Halſes befindet. Zieht man von dem Gewichte der ſo gefüllten Kugel das Gewicht der letzteren ab, ſo ergiebt ſich die Menge der Flüſſigkeit, welche bei 0°

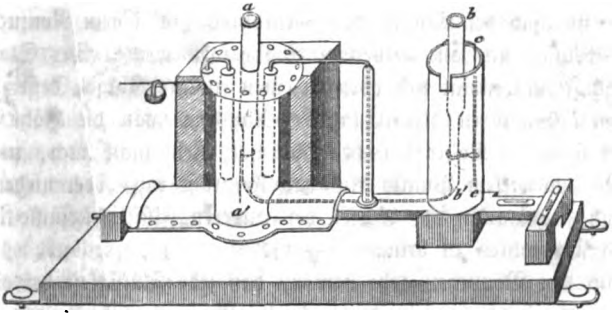


Digitized by Google

in die Kugel geht. Durch Erwärmen der Kugel dehnt ſich die Flüſſigkeit aus, ſo daß ſie über den Punkt a in das obere Gefäß ſteigt. Nimmt man nun wieder alle Flüſſigkeit, welche ſich oberhalb des Punktes a befindet, hinweg und wiegt von Neuem, ſo erfährt man mit Rückſicht auf die vorige Wägung durch eine leichte Rechnung die Ausdehnung der Flüſſigkeit.

Nach dieſen Methoden erhält man nur die ſcheinbare Ausdehnung der Flüſſigkeit, welche noch durch die Ausdehnung des Glasgefäßes corrigirt werden muß, um die abſolute zu erhalten. Es geſchieht dies dadurch, daß man die bekannte cubiſche Ausdehnung des Glasgefäßes zu der ſcheinbaren Ausdehnung der Flüſſigkeit addirt.

Dulong und Petit haben die abſolute Ausdehnung des Queckſilbers unmittelbar mittelſt eines Apparates beſtimmt, der aus zwei gleichen Röhren aa′ und bb′ beſteht, welche durch ein langes, feines



Röhrchen a′b′ mit einander verbunden ſind. Auf einem Brette von Holz, welches durch Schrauben gehörig horizontal geſtellt werden kann, iſt eine eiſerne Platte befeſtigt, auf welche jener Apparat zu ſtehen kommt. Bei gleicher Temperatur ſteht die Flüſſigkeit in beiden Röhren gleich hoch, wird aber die eine Röhre erkältet oder erwärmt, ſo muß natürlich in der anderen die Flüſſigkeit ſteigen oder ſinken. Aus der Differenz der Queckſilberſtände in beiden Röhren ergiebt ſich die Ausdehnung der Flüſſigkeit für eine beſtimmte Temperaturerhöhung. Die Röhre bb′ iſt von einem Cylinder umgeben, welcher mit geſtoßenem Eiſe angefüllt wird, wodurch ſich die Röhre fortwährend auf der Temperatur 0 erhalten läßt. Ebenſo iſt die Röhre aa′ in einem Cylinder von Kupferblech enthalten, welcher mit firem Oele gefüllt wird, deſſen Wärme durch einen Ofen vermehrt werden kann. Die Temperatur des Oelbades beſtimmt man durch zwei Thermometer; das eine iſt ein Luftthermometer, das andere ein Gewichtsqueckſilber-

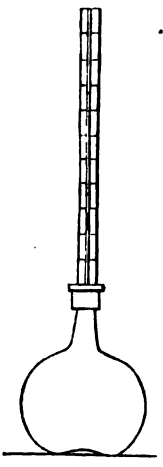
Digitized by Google

thermometer. Die Höhen der Flüssigkeitssäulen werden mit Hilfe eines Fernrohres gemessen, das sich mittelst einer Libelle genau horizontal stellen läßt. Auf einem Fuße mit 3 Stellschrauben ist nämlich ein massiver Stab, um welchen sich eine Hülse drehen läßt, vertical befestigt. An der Hülse befindet sich ein getheilter Stab, an dem das Fernrohr auf- und niedergeschoben werden kann. Dieses Instrument stellt man in einiger Entfernung vom vorigen Apparate so auf, daß man bald die eine, bald die andere Röhre in's Gesichtsfeld des Fernrohres bekommen kann. Befindet sich nun der Gipfel der Flüssigkeitssäule in der Röhre bb' eben in der Are des Fernrohres, so schiebt man das Fernrohr so weit in die Höhe, bis auch der Gipfel der Säule in der Röhre aa' in die Are des Fernrohres zu liegen kommt. Am getheilten Stabe liest man dann die Entfernung zwischen den beiden Stellungen des Fernrohres ab, woraus sich ohne Weiteres der Höhenunterschied der beiden Flüssigkeitssäulen ergiebt. Zum genaueren Ablesen ist noch der Träger des Fernrohres mit einem Nonius versehen, welcher sich am getheilten Stabe fortbewegt. Der Stab ce (s. obige Figur) endigt sich oben in einen eisernen Bügel, dessen Endpunkt zum Einvisiren dienen kann. Nachdem man die Höhe dieses Punktes über der Röhre bb' bestimmt hat, sieht man nach, um wie viel man von diesem Punkte aus das Fernrohr auf- oder niederschieben muß, um auch den Gipfel der anderen Flüssigkeitssäule in die Are des Fernrohres zu bringen. —

Aus den Versuchen geht hervor, daß jede Flüssigkeit bei einerlei Temperaturveränderung einen besonderen Gang der Ausdehnung befolgt und daß sie sich nur zwischen bestimmten Grenzen der Wärmezunahme proportional ausdehnt. So dehnt sich Quecksilber von 0° bis 100°, absoluter Weingeist nach Tralles von — 26°,11 bis 37,22 C. gleichförmig aus.

97. Wenn man Wasser von 0° erwärmt, so zeigt es die merkwürdige Eigenschaft, daß es sich bis zur Temperatur 4° C. fortwährend zusammenzieht, anstatt sich wie andere Flüssigkeiten auszudehnen. Erst wenn es über den erwähnten Punkt hinaus erwärmt wird, befolgt es das gewöhnliche Ausdehnungsgesetz. Es geht hieraus hervor, daß das Wasser bei 4° C. seine größte Dichtigkeit hat, während es sich bei 0° und 8° gleich dicht zeigt. Am einfachsten läßt sich diese Erscheinung mittelst eines etwas großen Wasserthermometers beobachten. Die Figur zeigt einen Apparat, welcher zu dieser Beobachtung sehr geeignet ist: Am Halse des Ballons ist eine Fassung von Messing angebracht, in welche sich eine in Messing gefaßte Glasröhre auf-

Digitized by Google



ſchrauben läßt. Auch befindet ſich am unteren Ende der Schraube ein Häkchen, an welches ein Thermometer zur Beobachtung der Temperatur gehängt wird. Zwiſchen der oberen Faſſung des Ballons und der Faſſung der Röhre iſt eine mit Talg getränkte Lederſcheibe gelegt, damit bei etwas ſtarkem Anziehen der Schraube kein Waſſer entweichen kann. Die Glasröhre iſt mit einem getheilten Stabe verſehen, auf dem man die Höhe der Waſſerſäule ableſen kann. Dieſen Apparat füllt man mit Waſſer von 0° C., erhöht allmälig die Temperatur und beobachtet die den verſchiedenen Temperaturen entſprechenden Waſſerſtände. Als Nullpunkt kann der unterſte Punkt des getheilten Stabes dienen. Bei dieſer Beobachtung iſt aber noch auf die Ausdehnung des Glaſes Rückſicht zu nehmen. Mit dem Steigen der Temperatur vergrößert ſich das Volumen des Glasgefäßes; die unmittelbar erhaltenen Waſſerſtände müſſen alſo auf diejenigen reducirt werden, welche ſtattfinden würden, wenn ſich das Glas nicht ausdehnte. Kennt man die cubiſche Ausdehnung des Glasgefäßes für 1°, ſo läßt ſich leicht die Länge des Röhrenſtücks berechnen, welche dieſer Ausdehnung entſpricht. Um dieſe Länge wird nun jedesmal das Waſſer lediglich in Folge der Ausdehnung des Gaſes ſinken, wenn die Temperatur um 1° ſteigt, oder mit anderen Worten, das Waſſer würde für jeden Grad Temperaturerhöhung um dieſe Länge höher ſtehen, wenn ſich das Glasgefäß nicht ausdehnte. Wenn man dies berückſichtigt, ſo laſſen ſich leicht die wahren Waſſerſtände finden und es zeigt ſich dann in der That, daß das Waſſer bei 4° C. die größte Dichtigkeit hat.

Wenn man in ein etwas hohes, mit Waſſer gefülltes Gefäß zwei Thermometer ſo einſenkt, daß die Kugel des einen ein wenig unter dem Waſſerſpiegel, die des anderen aber etwas über dem Boden des Gefäßes zu ſtehen kommt, ſo beobachtet man beim allmäligen Erkalten des Gefäßes in einem 1° bis 2° warmen Zimmer, daß anfänglich das untere Thermometer einen tieferen Stand hat, als das obere, daß bei etwa 4° beide Thermometer gleich ſtehen, daß endlich bei noch weiter fortgeſetztem Erkalten das untere Thermometer einen höheren Stand als das obere zeigt. Es rührt dies daher, daß das zu Anfang an den Wänden des Gefäßes abgekühlte Waſſer ſchwerer iſt als das noch wärmere Waſſer in der Mitte; jenes ſinkt an den Seiten herab, dieſes ſteigt in der Mitte auf, daher das Fallen des

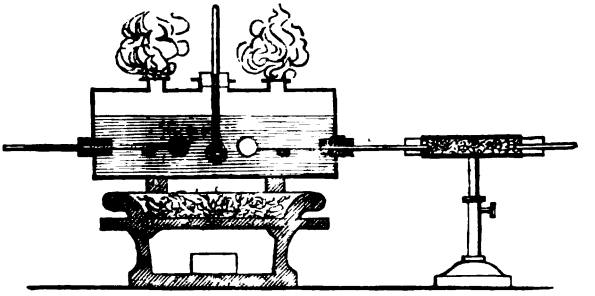
Digitized by Google

unteren Thermometers. Ist die Erkaltung bis zu 4° fortgeschritten, so findet im Augenblicke keine Bewegung des Wassers statt, beide Thermometer stehen gleich. Sobald aber die Temperatur unter 4° hinabsinkt, dehnt sich das Wasser wieder aus, und weil das an den Wänden des Gefäßes befindliche Wasser schneller als das in der Mitte erkaltet, also vorerst leichter als dieses ist, so muß jetzt das Wasser in der Mitte herabsinken, an den Seiten des Gefäßes aber aufsteigen. Das untere Thermometer muß also nun eine höhere Temperatur zeigen. Auf diese Weise haben Tralles, Hope und Hallström die Temperatur für das Dichtigkeitsmaximum des Wassers bestimmt.

98. Gasförmige Körper dehnen sich durch die Wärme noch stärker aus als tropfbare und feste Körper.

Um den Ausdehnungscoefficienten der Luft zu bestimmen, gebrauchte Gay-Lussac eine graduirte Thermometerröhre. Das Verhältniß des Kugelinhaltes zum Inhalte des durch zwei Theilstriche begrenzten Röhrenstücks war auf eine uns schon bekannte Weise durch Abwägen von Quecksilber genau bestimmt. Um alle Feuchtigkeit aus der Röhre zu entfernen, füllt man sie mit Quecksilber und kocht dieses aus. Alsdann wird die Röhre in ein etwas weiteres Rohr, welches mit Chlorcalciumstücken gefüllt ist, gebracht. Giebt man nun dem Ganzen eine verticale Stellung und schiebt einen durch das Chlorcalcium in die Thermometerröhre gesteckten Eisendraht auf und nieder, so wird das Quecksilber herausfließen und statt dessen Luft eintreten. Diese Luft ist vollkommen trocken, weil alle ihr anhängende Feuchtigkeit vom Chlorcalcium absorbirt worden ist. Eine kleine Quecksilbersäule, welche man noch in der Röhre zurückläßt, sperrt die in der letzteren und in der Kugel enthaltene Luft von der äußeren ab und dient zugleich als Index. Bringt man jetzt den Apparat in schmelzendes Eis, so wird der Index bei einem gewissen Theilstriche stehen bleiben und man kennt nun das Volumen, welches die abgesperrte Luft bei 0° einnimmt. Hierauf bringt man das Instrument horizontal in einen Blechkasten, der mit Wasser angefüllt ist, dessen Temperatur sich beliebig erhöhen läßt, wie man aus der folgenden Figur ersieht. Sobald die Temperatur des Wasserbades steigt, wird der Index in Folge der Luftausdehnung gegen das offene Ende der Röhre hingeschoben. Man beobachtet nun den Theilstrich, bei welchem der Index für eine gewisse Temperaturerhöhung des Wassers stehen bleibt. Auf diese Weise erfährt

Digitized by Google



man das durch die Wärme vergrößerte Volumen der eingeschlossenen Luft. Es versteht sich von selbst, daß man hierbei auf den Barometerstand Rücksicht zu nehmen habe, da der äußere Luftdruck der Spannkraft der inneren Luft entgegenwirkt. Daher muß man bei der Bestimmung des Volumens, welches die abgesperrte Luft bei 0° einnimmt, zugleich den Barometerstand notiren und bei der nachherigen Volumensbestimmung nachsehen, ob der Barometerstand sich geändert hat oder nicht. Im letzteren Falle ist keine Correction nöthig, im ersteren muß man aber das beobachtete Volumen auf dasjenige reduciren, welches stattfinden würde, wenn der Barometerstand sich nicht geändert hätte. Auch ist noch die cubische Ausdehnung des Glases als Correction in Rechnung zu bringen, die übrigens hier im Vergleiche zur Ausdehnung der Luft nicht von Bedeutung ist. Für eine Temperaturerhöhung von 100° beträgt die cubische Ausdehnung des Glases 0,0025; diese Zahl ist nun noch zum Volumen der Luft bei 100° zu addiren, um die wahre Ausdehnung der Luft für die eben angegebene Temperaturerhöhung zu erhalten. Gay-Lussac fand so die Ausdehnung der Luft bei einer Temperaturveränderung von 0° bis 100° zu 0,375, woraus sich für jeden einzelnen Grad der Ausdehnungscoefficient 0,00375 ergiebt. Um diese Größe dehnt sich also ein gegebenes Volumen Luft von 0° aus, wenn seine Temperatur um 1° erhöht wird. Dieser Coefficient gilt auch für alle anderen Gase, so daß sich alle Gase in demselben Verhältniß und der Zunahme der Temperatur proportional ausdehnen.

Nach einer anderen Methode fand Rudberg für den Ausdehnungscoefficienten der Luft die Zahl 0,365.

Er bediente sich einer Glaskugel von etwa 2,5 Centimeter Durchmesser, welche mit einer Thermometerröhre versehen war. Dieser Apparat wird mit trockener Luft gefüllt, indem man die Spitze der Röhre in eine Chlorcalciumröhre steckt und ihn dann erwärmt. Hierdurch

Digitized by Google

wird, wie wir wissen, ein Theil der in der Kugel enthaltenen Luft ausgetrieben, so daß beim Erkalten des Apparates von außen Luft eintritt, welche vollkommen trocken ist, da ja die ihr anklebende Feuchtigkeit vom Chlorcalcium zurückgehalten wird. Um versichert zu sein, daß alle Feuchtigkeit entfernt sei, wiederholte Rudberg diese Operation etwa 50 mal. Statt die Luft auf diese Weise zu trocknen, verband er auch den Apparat nebst der Chlorcalciumröhre mit einer Luftpumpe, entleerte diese und ließ dann wieder von außen Luft durch das Chlorcalcium eintreten, welche Operation er mehrmals wiederholte. Beide Austrocknungsmethoden gaben ganz gleiche Resultate. Die so mit trockener Luft gefüllte Kugel wurde nun längere Zeit der Siedehitze des Wassers ausgesetzt, dann die Spitze der Röhre zugeschmolzen und die Kugel gewogen. Ein Metallschälchen, welches etwa von der Größe und Gestalt eines Uhrglases war, hatte in der Mitte eine Oeffnung, durch welche die Röhre dergestalt gesteckt wurde, daß die Kugel auf dem Schälchen ruhte und also die Spitze der Röhre nach unten gerichtet war. Das Schälchen selbst befindet sich auf einem besonderen Träger. Hierauf ließ er die Spitze der Röhre in ein Gefäß mit Quecksilber tauchen, brach die Spitze ab und legte auf das Schälchen schmelzenden Schnee, welcher immer durch anderen ersetzt wurde, bis die Kugel die Temperatur 0 angenommen hatte. In dem Grade nun, als die Kugel erkaltet, zieht sich die Luft im Apparate zusammen und in eben dem Maße muß Quecksilber aus dem Gefäße in die Röhre bringen. Sobald man sich überzeugt hat, daß die Kugel auf 0° erkaltet ist, verstopft man die Spitze der Röhre unter dem Quecksilber mit Wachs. Zugleich notirt man sich den gerade statthabenden Barometerstand. Dann bringt man die Kugel auf die Wage und bestimmt das Gewicht des eingedrungenen Quecksilbers. Bei Rudberg's Anordnung des Versuchs betrug dieses Gewicht 41,722 Grammen. Hierauf wurde die Spitze der Röhre so umgebogen, daß sie bequem in ein Gefäß mit Quecksilber gebracht werden konnte. Kocht man nun das Quecksilber in der Kugel aus, so wird sämmtliche Luft aus dem Apparate entfernt und dieser wird sich vollständig mit Quecksilber füllen und zwar, wenn man die Kugel durch schmelzendes Eis erkaltet, mit Quecksilber von 0° C. Das Gewicht dieses Quecksilbers betrug 173,443 Gr. Bei der Siedehitze des Wassers (100°) nahm die im Apparate zurückgebliebene Luft die ganze Kugel ein. Da nun beim Abbrechen der Spitze 41,722 Gr. Quecksilber in die Kugel eingedrungen waren und die ganze Kugel bei 0° 173,443 Gr. Quecksilber faßt, so muß offenbar die in der Kugel zurückgebliebene Luft bei

Digitized by Google

0° einen Raum einnehmen, welcher so groß ist als ein Volumen Queckſilber, deſſen Gewicht 173,443 — 41,722 — 131,721 Gr. beträgt. Man kennt nun das Verhältniß des Volumens der auf 100° erhitzten Luft zum Volumen der auf 0° erkalteten, woraus folgt, daß ſich die Luft bei einer Temperaturerhöhung von 0° bis 100° im Verhältniſſe von 131,721 : 173,443 oder im Verhältniſſe von 1 : 1,34 .... ausdehnt.

Dieſes Reſultat bedarf noch einer Correction wegen des veränderten Barometerſtandes. Denn man ſieht wohl, daß das Verhältniß, in welchem ſich die Luft ausdehnt, nur dann rein hervortreten kann, wenn das durch die Wärme vergrößerte Volumen mit dem anfänglichen auf einerlei äußeren Luftdruck reducirt worden iſt. Als die Spitze der Röhre mit Wachs verklebt wurde, war nun der Barometerſtand 77,58 Centimeter, während das Queckſilber in der Kugel 3,81 Centimeter über dem Queckſilber im Gefäße ſtand. Der wahre Druck, welchen die im oberen Theile der Kugel befindliche Luft auszuhalten hatte, war alſo 77,58 — 3,81 — 73,77 Centimeter. Beim Beginne der Beobachtung aber, als die Spitze der Röhre abgebrochen wurde, betrug der Barometerſtand 76,36 Centimeter. Das Gewicht des Queckſilbers alſo, welches mit der in der Kugel enthaltenen Luft nach ihrem Erkalten auf 0° gleichen Raum einnimmt, beträgt $131{,}721 \frac{7377}{7636}$ — 127,25 Gramme. Mithin dehnt ſich die Luft von 0° bis 100° bei unverändertem Luftdrucke im Verhältniſſe von 127,25 : 173,443 oder im Verhältniſſe von 1 : 1,363 aus, ſo daß der Ausdehnungscoefficient der Luft durch die Zahl 0,363 ausgedrückt wird. Hierzu kommt noch eine Correction wegen der Ausdehnung des Glaſes. Die cubiſche Ausdehnung deſſelben iſt, wie ſchon bemerkt, 0,0025. Dies zu 0,363 addirt giebt den wahren Ausdehnungscoefficienten der Luft zu 0,3655.

Ein anderes Verfahren, welches Rudberg zu eben dem Zwecke anwandte, gründet ſich darauf, daß der Druck der Luft oder überhaupt eines Gaſes bei unverändertem Volumen in demſelben Verhältniſſe zunimmt, in welchem es ſich ſonſt ausgedehnt hätte. Die Einrichtung war hier ſo getroffen, daß die abgeſperrte Luft ſich mit einer Queckſilberſäule und dem atmoſphäriſchen Drucke in's Gleichgewicht ſetzen mußte. Sei nun, wenn die Luft die Temperatur 0 hat, b der Barometerſtand und h die Höhe der Queckſilberſäule, mit welcher die Luft bei dieſer Temperatur und bei dieſem Barometerſtande im Gleichgewichte ſteht. Dann iſt b + h der Druck, welchen die eingeſchloſſene.

Digitized by Google

Luft wirklich auszuhalten hat. Wird nun die Luft von 0° bis 100° erwärmt, so muß sie sich wegen vermehrter Spannkraft ausdehnen; soll dies aber nicht geschehen, so muß die vorige Quecksilbersäule durch Hinzuthun von neuem Quecksilber auf entsprechende Weise erhöht werden. Sei nun h' die Höhe der Quecksilbersäule, welche im Stande ist, die erwärmte Luft in ihrem Volumen bei 0° zu erhalten, und b' der gleichzeitige Barometerstand; dann ist b' + h' der Druck, welchen die abgesperrte Luft jetzt auszuhalten hat. Hieraus folgt aber, daß sich die Luft bei einer Temperaturerhöhung von 0° bis 100° im Verhältnisse von b + h : b' + h' ausgedehnt haben würde, wenn der Druck unverändert geblieben wäre. Der sich hieraus ergebende Ausdehnungscoefficient muß noch auf bekannte Weise durch die cubische Ausdehnung des Glases corrigirt werden. Rudberg fand nach dieser Methode als Mittel aus mehreren nahe übereinstimmenden Resultaten die Zahl 0,36457.

Auch Magnus und Regnault haben unabhängig von einander durch sehr genaue Versuche den Ausdehnungscoefficienten der Luft bestimmt. Magnus bediente sich der beiden Rudberg'schen Methoden, Regnault gebrauchte außer diesen aber noch zwei andere, welche indessen mit denen Rudberg's auf demselben Principe beruhten. Ihre Endresultate stimmten vollkommen mit einander überein, indem sie beide als Mittel aus ihren Versuchen 0,3665 erhielten, welche Zahl daher ohne Zweifel als der wahre Ausdehnungscoefficient der Luft betrachtet werden kann. —

Magnus und Regnault haben durch genaue Versuche dargethan, daß der Ausdehnungscoefficient nicht für alle Gase ganz derselbe ist. Der Ausdehnungscoefficient solcher Gase nämlich, welche sich zu tropfbaren Flüssigkeiten comprimiren lassen, ist größer als derjenige der atmosphärischen Luft, und zwar um so größer, je leichter sie tropfbar flüssig werden. Es kann mithin jenes Gesetz einer gleichförmigen Ausdehnung aller Gase durch die Wärme nur für den vollkommenen Gaszustand gelten und es wird also bei jenen Gasen, welche sich zu tropfbaren Flüssigkeiten comprimiren lassen, um so reiner hervortreten, je weiter sie von dem Punkte des Ueberganges in die tropfbarflüssige Form entfernt sind.

99. Weil die Ausdehnung der atmosphärischen Luft durch die Wärme durchaus gleichförmig ist, so kann sie auch zweckmäßig zur Bestimmung verschiedener Temperaturgrade benutzt werden. Man erhält ein Luftthermometer, wenn man ein Gefäß von der Form eines gewöhnlichen Quecksilberthermometers mit wohl getrockneter Luft füllt

Digitized by Google

und diese durch eine kleine Queckſilberſäule von der äußeren Luft abſperrt. Dieſem Apparate, welcher mit einer Volumſcale verſehen iſt, giebt man eine horizontale Lage. Sobald die Temperatur ſteigt, dehnt ſich die Luft aus und das Queckſilberſäulchen wird gegen das offene Ende der Röhre hingetrieben; das Gegentheil geſchieht, wenn ſich die Luft beim Erkalten zuſammenzieht. Man ſieht aber unmittelbar, daß das Volumen der abgeſperrten Luft und demgemäß die Lage des Queckſilberſäulchens nicht allein von der Temperatur, ſondern auch von dem äußeren Luftdrucke abhängen muß. Daher hat man bei jeder Beobachtung den Barometerſtand zu berückſichtigen. Man bemerkt, daß dieſes Inſtrument mit jenem übereinkommt, deſſen ſich Gay-Luſſac zur Beſtimmung des Ausdehnungscoefficienten bediente. Statt deſſen kann man aber auch den zuerſt erwähnten Rudberg'ſchen Apparat als Luftthermometer anwenden. Derſelbe beſteht bekanntlich aus einer mit trockener Luft gefüllten Glaskugel, die mit einer in eine feine Spitze auslaufenden Röhre verſehen iſt. Man ſetzt dieſen Apparat der Temperatur aus, welche beſtimmt werden ſoll, und beſtimmt dann die Queckſilbermenge, welche beim Erkalten in die Kugel dringt. Ermittelt man darauf noch die Queckſilbermenge, welche das ganze Gefäß faßt, ſo ergiebt ſich aus dem Verhältniſſe dieſer beiden Queckſilbermengen der Temperaturunterſchied. Uebrigens muß man bei der Beſtimmung hoher Temperaturen auch noch auf die Ausdehnung des Glasgefäßes Bedacht nehmen.

Wegen der gleichförmigen Ausdehnung der Luft iſt das Luftthermometer zur Regulirung anderer Thermometer beſonders geeignet. Das Queckſilberthermometer zeigt mit dem Luftthermometer von 0° bis 100° einen völlig übereinſtimmenden Gang, aber über 100° hinaus eilt jenes voraus. Das Queckſilber dehnt ſich daher auch nur von 0° bis 100° regelmäßig aus und es iſt deshalb bei der Beſtimmung hoher Temperaturen räthlich, ſich des Luftthermometers zu bedienen, zumal da bei ihm wegen der bedeutenden Ausdehnung der Luft die Ausdehnung des Glaſes bei Weitem weniger von Einfluß iſt als bei einem Queckſilberthermometer.

100. Man wird wohl aus dem Vorhergehenden entnommen haben, wie ſehr die Dichtigkeit der Luft und der Gaſe überhaupt von der Wärme abhängen müſſe. Natürlich muß ſich auch die Dichte der feſten und tropfbarflüſſigen Körper mit der Temperatur ändern, doch iſt dies innerhalb gewiſſer Grenzen, namentlich bei den erſteren, nicht von ſo großer Bedeutung.

Um die Dichte der Luft zu beſtimmen, iſt es nöthig, das abſolute

Digitized by Google

Gewicht eines gegebenen Volumens derselben zu ermitteln. Man gebraucht hierzu einen Ballon von etwa 10 Litre Inhalt, welcher vermittelst einer messingenen Fassung, in der sich ein Hahn befindet, auf eine Luftpumpe geschraubt werden kann. Den cubischen Inhalt des Ballons bestimmt man dadurch, daß man ihn bei einer gegebenen Temperatur sowohl mit Wasser gefüllt als auch leer wägt. Aus dem Unterschiede dieser Gewichte ergiebt sich das Volumen, welches noch für die Ausdehnung des Wassers durch die Wärme corrigirt werden muß. Man mache nun den Ballon möglichst luftleer, bestimme sein Gewicht P auf einer guten Wage, öffne dann den Hahn und lasse atmosphärische Luft einströmen. Das Gewicht des Ballons sei jetzt P′, dann ist P′ — P das Gewicht der im Ballon befindlichen Luft und wenn V das zuvor bestimmte Volumen des Ballons ist, so hat man $\frac{P' - P}{V}$ für die Dichtigkeit der atmosphärischen Luft.

Diese Formel kann nicht ganz genau sein, weil sie voraussetzt, daß der Ballon bei der Gewichtsbestimmung ganz luftleer sei. Es wird aber beim Auspumpen des Ballons immer noch etwas Luft zurückbleiben, was in Rechnung gebracht werden muß. Um also das absolute Gewicht der ganzen im Ballon befindlichen Luft zu ermitteln, ist es erforderlich, das Gewicht jener im Ballon nach dem Auspumpen zurückgebliebenen Luft zu bestimmen. Man nehme nun zu diesem Behufe an, der Ballon sei bei einem Barometerstande von B Millimeter so weit entleert, daß die Barometerprobe der Luftpumpe nur noch b′ Millimeter zeigt. Dann hat man, wenn P das Gewicht des mit Luft erfüllten Ballons ist, $\frac{P\,b'}{B}$ (da $B : b' = P : x$) für den Antheil Luft, welcher nach dem Auspumpen noch im Ballon zurückbleibt. Weil nun der ausgepumpte Ballon um diese Größe mehr wiegt als wenn er ganz leer wäre, so ist dieselbe noch von seinem Gewichte abzuziehen oder, was dasselbe ist, zum Gewichte des mit Luft erfüllten Ballons zu addiren, um das wahre absolute Gewicht der den ganzen Ballon einnehmenden Luft zu erhalten. Außerdem sind noch einige nothwendige Correctionen hinsichtlich der Wärme und des Barometerstandes vorzunehmen. Da sich die Dichte der Luft mit der Temperatur und dem Barometerstande ändert, so muß man die bei einem gewissen Luftdrucke erhaltene Dichtigkeit auf die Temperatur 0 und auf den mittleren Barometerstand b = 760 Millimeter reduciren. Sei nun d die auf obige Art gefundene Dichte der Luft bei der Temperatur t und dem Barometerstande B. Wir wissen, daß

Digitized by Google

sich die Luft bei einer Temperaturerhöhung von 0° bis t° im Verhältniß von 1 : 1 + 0,00366 t ausdehnen muß, da die Zahl 0,00366 der Ausdehnungscoefficient der Luft für eine Temperaturzunahme von 0° bis 1° ist. Umgekehrt also muß die Luft bei einer Temperaturerniedrigung von t° bis 0° im Verhältniß von 1 : 1 + 0,00366 t dichter werden. Wenn man demnach die Dichtigkeit d bei t° mit 1 + 0,00366 t multiplicirt, so erhält man die Dichte der Luft bei 0°, nämlich d (1 + 0,00366 t). Nun ist aber auch die Dichte der Luft im Ballon dem atmosphärischen Drucke oder dem Barometerstande proportional, daher H : h = d (1 + 0,00366 t) : d', woraus sich ohne Weiteres $d' = \frac{d\,(1 + 0{,}00366\,t)\,h}{H}$ ergiebt.

Man hat nun gefunden, daß das Gewicht eines Cubikcentimeters Luft bei 0° C. und bei einem Barometerstande von 760 Millimeter 0,001299 Gramm beträgt, daß also die Luft in diesem Falle 770 Mal leichter als Wasser ist. Uebrigens hat man bei sehr genauen Versuchen dieser Art auch noch auf die Ausdehnung der Glashülle und auf den Umstand Rücksicht zu nehmen, daß der Ballon, wenn sein Gewicht in der Luft bestimmt wird, um so viel weniger wiegt, als die Quantität Luft beträgt, welche er aus der Stelle vertreibt. Diese Quantität ist aber dem Gewichte der in ihm enthaltenen Luft und desjenigen Volumens derselben gleich, welches durch die Wände und die Fassung des Ballons aus der Stelle getrieben wird. Dieser Gewichtsbetrag wäre also noch dem unmittelbar durch die Wägung erhaltenen Gewichte des Ballons durch Addition beizufügen.

Nach der bisher erläuterten Methode läßt sich auch die Dichtigkeit der anderen Gase bestimmen. Kennt man aber einmal das specifische Gewicht der Luft, so ist das der übrigen Gasarten leichter zu ermitteln, ohne daß man eine Correction vorzunehmen hat; denn man braucht nur ihr absolutes Gewicht mit dem Gewichte eines gleichen Volumens Luft bei derselben Temperatur und bei demselben Barometerstande zu vergleichen. Ist also nach dem Obigen das Gewicht des Ballons mit trockener Luft P', das des leeren P, so ist P' — P das Gewicht der im Ballon enthaltenen Luft. Beträgt dann das Gewicht des mit irgend einer Gasart gefüllten Ballons Q, so hat man Q — P für das Gewicht des Gases, welches der Ballon faßt. Demnach ist offenbar das specifische Gewicht des Gases $\frac{Q - P}{P' - P}$.

Die folgende Tabelle enthält die Dichtigkeiten verschiedener Gase.

Digitized by Google

Namen der Gase.	Dichtigkeit.
Atmosphärische Luft	1,0000
Sauerstoffgas	1,1026
Stickgas	0,9757
Wasserstoffgas	0,0688
Stickstoffoxydulgas	1,5269
Stickstoffoxydgas	1,0388
Kohlensäure	1,5245
Kohlenoxydgas	0,9757
Cyangas	1,8197
Salzsäuregas	1,2474
Schwefelwasserstoffgas	1,1912
Ammoniakgas	0,5967
Chlor	2,4216
Schwefligsaures Gas	2,1930
Jodwasserstoffgas	4,4288
Oelbildendes Gas	0,9804

Zweites Kapitel.

Von der Aenderung des Aggregatzustandes durch die Wärme.

101. Wenn ein fester Körper dem andauernden Einflusse einer Wärmequelle ausgesetzt ist, so nimmt der Zusammenhang zwischen seinen einzelnen Masse theilchen fortwährend ab, seine Temperatur steigt bis zu einem gewissen Punkte, wo er beginnt, aus dem festen in den tropfbarflüssigen Zustand überzugehen. Man sagt, der Körper *schmilzt*. Alle Wärme, welche ihm von diesem Augenblicke an noch zugeführt wird, erhöht seine Temperatur nicht mehr; sie ist für das Gefühl und für das Thermometer völlig verschwunden und dient nur, den Proceß des Schmelzens zu vervollständigen. Den Wärmegrad, für welchen der Uebergang des Körpers aus dem festen in den flüssigen Zustand erfolgt, nennt man den *Schmelzpunkt*, welcher bei verschiedenen Körpern verschieden, bei einem und demselben aber unveränderlich ist.

Digitized by Google

Die folgende Tabelle enthält die Schmelzpunkte verschiedener Körper in Graden des hunderttheiligen Thermometers.

Quecksilber	— 39 Grad.
Terpentinöl	— 10 "
Wein	— 5 "
Eis	0 "
Seife	33 "
Talg	40 "
Phosphor	43 "
Essigsäure	45 "
Wallrath	49 "
Stearin	49—43 "
Kalium	58 "
Gelbes Wachs	61 "
Weißes Wachs	68 "
Stearinsäure	70 "
Natrium	90 "
Legirung aus 4 Wismuth, 1 Blei, 1 Zinn	94 "
Legirung aus 8 " 5 " 3 "	100 "
Zinn	230 "
Wismuth	256 "
Blei	334 "
Zink	360 "
Antimon	432 "
Bronze	900 "
Silber	1000 "
Gold	1250 "
Leichtflüssiges weißes Gußeisen	1050 "
Graues Gußeisen	1200 "
Der leichtflüssigste Stahl	1300 "
Der strengflüssigste Stahl	1400 "
Weiches französisches Eisen	1500 "
Gehämmertes englisches Eisen	1600 "

Bemerkenswerth sind die angeführten Metalllegirungen, welche einen tieferen Schmelzpunkt haben als jedes der einzelnen Metalle für sich. Auch bei anderen Mischungen verschiedener Stoffe ist dies der Fall, so z. B. wenn man kohlensaures Kali und kohlensaures Natron oder wenn man Schnee mit Kochsalz mengt.

Viele organische und selbst unorganische Körper werden durch Einwirkung der Wärme zersetzt, ehe sie schmelzen. Doch hat Hall gezeigt,

Digitized by Google

daß einige von ihnen, z. B. Marmor, geschmolzen werden können, wenn man sie während der Erhitzung einem hohen Drucke aussetzt, durch welchen die flüchtigen Bestandtheile zurückgehalten werden.

102. Bringt man Eis in ein warmes Zimmer, so schmilzt es bei 0°, ohne daß sich von hier an seine Temperatur erhöht. Wenn man 1 Pfund Schnee von 0° mit 1 Pfund Wasser von 79° rasch vermischt, so schmilzt der Schnee und man erhält 2 Pfund Wasser von 0°. Daraus folgt, daß eine Schneemasse von 0° beim Schmelzen so viel Wärme bindet, als eine gleiche Wassermasse nöthig hat, um von 0 bis 79° erwärmt zu werden. Man nennt die Wärmemenge, welche ein Körper während des Schmelzens in sich aufnimmt und die eben die Formverwandlung des Körpers bewirkt, seine gebundene oder latente Wärme. Dieselbe ist bei verschiedenen festen Körpern sehr verschieden. So beträgt sie nach Irvine beim Wachs 97, beim Schwefel 80, beim Blei 90, beim Zink 274, beim Zinn 278 und beim Wismuth 305 Wärmeeinheiten, indem man unter einer Wärmeeinheit die Wärmemenge versteht, welche erforderlich ist, um die Temperatur von 1 Pfund Wasser um 1° zu erhöhen.

Nicht allein beim Schmelzen eines Körpers wird Wärme gebunden, sondern überall, wo ein fester Körper durch Auflösung in den flüssigen Zustand übergeht. Bringt man ein Salz, z. B. Salpeter, in Wasser und rührt es gehörig um, so löst sich das Salz auf und die Temperatur sinkt bedeutend. Hierauf beruhen die sogenannten Kältemischungen. Will man auf diese Weise bedeutende Kältegrade hervorbringen, so muß man von den zu vermischenden Stoffen möglichst große Massen anwenden und durch hinreichendes Pulverisiren der Salze dafür Sorge tragen, daß die Auflösung rasch von Statten geht. Um den Wärmeeinfluß der Umgebung abzuhalten, muß man das Gefäß, worin die Mischung enthalten ist, mit schlechten Wärmeleitern umgeben und, falls man einen sehr hohen Kältegrad erzeugen will, die zu vermischenden Stoffe selbst vor der Mischung stark erkalten.

Gepulvertes Glaubersalz mit Salzsäure übergossen bringt eine Temperaturerniedrigung . . . . . von +10 bis −17° C. hervor.

5 Gewichtstheile	Salmiak	bringen eine		
5 „	Salpeter	Temperatur-	von +10 bis −12°	„
19 „	Wasser	erniedrigung		
1 „	Kochsalz			
3 „	Schnee	dito	von 0 bis −17,7°	„

Digitized by Google

3 Gewichtstheile	salzs. Kalk	} bringen eine Temperaturerniedrigung }	von 0 bis — 28° C.	hervor.
2 "	Schnee			
1 "	verdünnte Schwefels.	} dito	von — 7 bis — 51°	"
1 "	Schnee			

103. Geht ein tropfbarflüssiger Körper in den festen Zustand über, so geschieht dies bei der Temperatur des Schmelzpunktes, und alle Wärme, welche der Körper beim Schmelzen gebunden hatte, wird hierbei frei. Indessen kann ein flüssiger Körper selbst mehrere Grade unter den Schmelzpunkt erkalten, ohne zu gefrieren. Man bringe z. B. Wasser in einem Glasgefäße, welches oben in eine feine Spitze ausgezogen ist, zum Kochen und schmelze das Gefäß in dem Augenblick, wo durch die entwickelten Dämpfe alle Luft ausgetrieben ist, zu. Der Wasserdampf, welcher noch im Gefäße über dem Wasser zurückbleibt, übt dann bei geringer Temperatur nur einen schwachen Druck aus. Man kann nun das Gefäß auf — 12° bis — 16° erkalten, ohne das Wasser zum Gefrieren zu bringen. Durch eine mäßige Erschütterung wird aber die ganze Wassermasse plötzlich fest, wobei die Temperatur bis auf 0°, den Schmelzpunkt des Eises, steigt, wovon man sich durch ein Thermometer, das mit seiner Kugel in das Wasser des Gefäßes eingetaucht ist, überzeugen kann. Schließt man eine kochend heiße, gesättigte Glaubersalzlösung luftdicht in ein Gefäß ein und läßt dieses ruhig stehen, so bleibt die Lösung flüssig, dagegen wird sie sogleich fest, wenn man sie erschüttert oder mit einem festen Körper in Berührung bringt.

Während Wasser, welches mehrere Grade unter 0 erkaltet ist, mit einem Mal erstarrt, wobei, wie erwähnt, seine Temperatur auf 0° steigt, gefriert Wasser von 0° nur langsam und zwar ohne merkliche Temperaturerhöhung. Das Festwerden beginnt meist gleichzeitig von verschiedenen Punkten der Wasserfläche, aus indem man an diesen Stellen feine Eisnadeln bemerkt, welche sich allmälig unter einander verbinden. Die zuerst erstarrenden Theilchen geben ihre gebundene Wärme an die benachbarten ab, wodurch diese noch eine Zeitlang flüssig erhalten werden.

Wenn ein Körper aus einer Auflösung herauskrystallisirt, so muß gleichfalls die Wärme, welche bei seiner Auflösung gebunden wurde, wieder frei werden. Je langsamer dieser Proceß vor sich geht, desto größer und regelmäßiger werden die Krystalle. Befindet sich dagegen die Masse in Bewegung und erkaltet sie sehr rasch, so haben die Theilchen zu einer regelmäßigen Lagerung keine Zeit.

Digitized by Google

Ebenso wird Wärme frei, wenn Wasser mit irgend einem Stoffe einen festen Körper bildet, z. B. wenn sich Wasser mit gebranntem Kalk zu Kalkhydrat verbindet.

Das Erstarren geschmolzener Legirungen von Blei und Zinn, Zinn und Wismuth, Zinn und Zink u. s. w. ist von Rudberg genauer untersucht worden, indem er in die Legirung ein Thermometer steckte und das Sinken desselben mit der Erkaltungszeit verglich. Er fand so, daß das Thermometer bei einem gewissen Grade stehen bleibt, ohne daß hiermit ein sichtbares Erstarren des Metalls eintritt, daß es aber nach einiger Zeit wieder fällt bis zu einem festen Punkte, bei dem nun die ganze Masse erstarrt. Der letztere Punkt ist unabhängig von dem Verhältnisse, in welchem die Metalle gemischt sind, er fällt immer auf denselben Grad der Thermometersäule; der erst erwähnte Punkt ändert sich aber mit dem Mischungsverhältnisse der Metalle und zwar in der Art, daß er höher wird, wenn man dem schon vorherrschenden Metalle einen Zusatz giebt.

104. Wenn eine tropfbare Flüssigkeit erwärmt wird, so vermindert sich allmälig ihre Masse, so daß sie zuletzt ganz verschwindet, d. h. sie wird ausdehnsam und unsichtbar wie ein Gas. In diesem Zustande nennt man die Flüssigkeit Dampf. So nimmt das Wasser an der Oberfläche der Erde durch Einwirkung der Sonnenwärme Dampfform an. Schneller geht die Verdampfung von Statten, wenn man eine Schale mit Wasser über einem Feuer zum Kochen bringt.

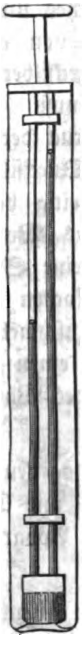
Der Dampf ist elastisch wie ein Gas und setzt daher auch jedem Hinderniſſe seiner Ausbreitung einen bestimmten Widerstand entgegen. Stellt man in ein weites, Quecksilber enthaltendes Gefäß mehrere gefüllte Barometerröhren neben einander, so muß das Quecksilber in allen gleich hoch stehen. Bringt man aber in eine dieser Röhren etwas Wasser, welches durch Kochen von der anhängenden Luft befreit ist, so wird es schnell bis zum leeren Raume aufsteigen. Alsbald sinkt die Quecksilbersäule um einige Millimeter, was nur daher rühren kann, daß sich aus dem Wasser Dampf gebildet hat, welcher auf die Säule einen bestimmten Druck ausübt. Gesetzt nun, das Quecksilber stehe in dieser Röhre um a Millimeter tiefer als die Quecksilberkuppe des nebenstehenden Barometers, dann ist offenbar der Druck, welchen der Wasserdampf auf das Quecksilber ausübt, gleich dem Drucke einer Quecksilbersäule von a^{mm} Höhe. Hätte man in eine der erwähnten Röhren statt Wasser eine andere Flüssig-

Digitized by Google

keit, z. B. Schwefeläther, gebracht, so würde die Queckſilberſäule viel bedeutender herabgedrückt worden ſein, ſo daß ſie bei einer mittleren Temperatur die Hälfte des Barometerſtandes beträgt. Die Spannkraft des Aetherdampfes iſt alſo in dieſem Falle gleich dem Drucke einer halben Atmoſphäre.

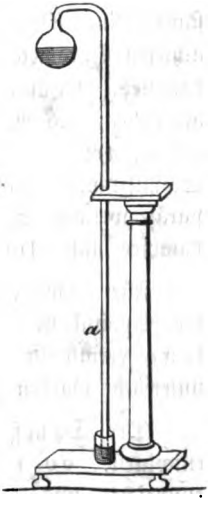
Die Dampfbildung iſt wie der Proceß des Schmelzens lediglich eine Wirkung der Wärme. Man war früher der Meinung, daß die Luft das Auflöſungsmittel für tropfbare Flüſſigkeiten ſei, dergeſtalt, daß ſich dieſe Flüſſigkeiten in der Luft auf ähnliche Weiſe auflöſten, wie die Salze im Waſſer. Da aber das Waſſer, wie jede tropfbare Flüſſigkeit, im leeren Raume nach demſelben Geſetze wie in der Luft verdunſtet, ſo ſieht man ſogleich das Irrige dieſer Meinung ein.

105. Will man die Spannkraft des Waſſerdampfes für verſchiedene Temperaturen beſtimmen, ſo kann man ſich eines Verfahrens von Dalton bedienen. In ein Gefäß mit Queckſilber (Fig. 1) ſind zwei Barometerröhren geſtellt, von denen die eine ein vollſtändiges Barometer bildet, während ſich in der anderen oberhalb des Queckſilbers etwas Waſſer befindet, das zum Theil im leeren Raume verdampft.



1.

Dieſe beiden Röhren werden nun mittelſt eines Stabes aus Eiſen, an dem ſie befeſtigt ſind, in einen mit Waſſer gefüllten Glascylinder geſenkt. Das im letzteren befindliche Waſſer kann man allmälig auf alle Temperaturen bringen, welche zwiſchen 0° und 100° liegen. Die Temperatur des Waſſers, welche zugleich die des Barometers und des Waſſerdampfes in der anderen Röhre iſt, läßt ſich durch ein Thermometer mit cylindriſchem Gefäße meſſen. Aus dem Unterſchiede der Queckſilberſtände beider Barometer ergiebt ſich die Spannkraft des Waſſerdampfes für die gerade ſtatthabende Temperatur.



Auch bei und unter 0° bilden ſich noch Waſſerdämpfe von merklicher Spannung, welche ſich mittelſt des rechts ſtehenden Apparates beſtimmen läßt. In die Kugel bringt man Waſſer und kocht daſſelbe ſo lange, bis ſämmtliche Luft daraus entfernt iſt. Alsdann ſtellt man die Röhre in ein mit Queck-

Digitized by Google

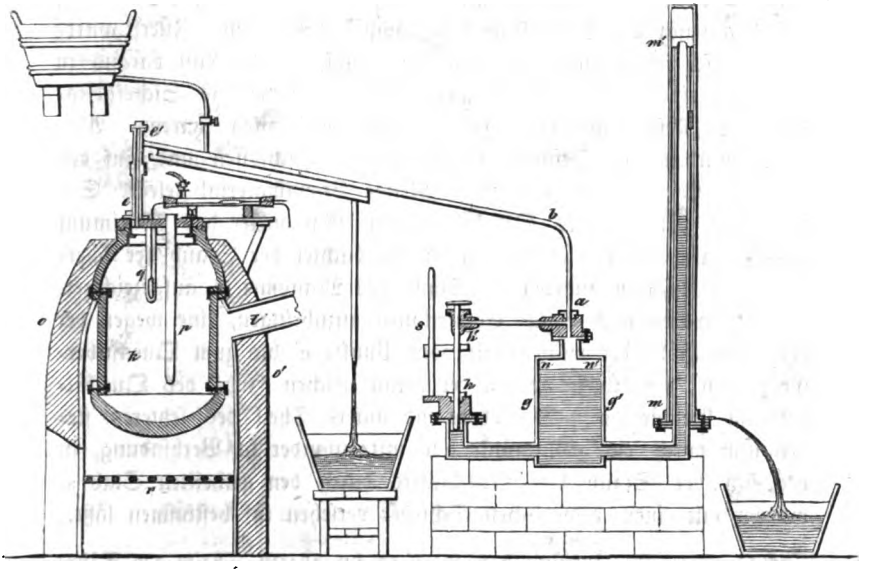
silber gefülltes Gefäß und umgiebt die Kugel, wenn man die Spannkraft des Wasserdampfes gerade bei 0° ermitteln will, mit gestoßenem schmelzenden Eis oder Schnee. Für Temperaturen unter 0° taucht man die Kugel in eine Kältemischung. Aus der Differenz zwischen dem Stande des Queckſilbers in der Röhre und dem Barometerſtande ergiebt ſich die Spannkraft des Waſſerdunſtes. Man ſieht leicht, daß der Raum, in welchem ſich hier der Waſſerdunſt ausbreitet, an verſchiedenen Stellen eine ungleiche Temperatur haben muß. Nun kann zwiſchen den verſchiedenen Theilchen des Dunſtes nur dann Gleichgewicht beſtehen, wenn allenthalben eine gleiche Spannkraft herrſcht. Daher müſſen hier die Dämpfe überall diejenige Spannung annehmen, welche den kälteſten Stellen des Raumes entſpricht. Deshalb ſteigt auch das Queckſilber in der Röhre a zu derſelben Höhe auf, mag man nun die Kugel allein oder auch noch die ganze Röhre bis zum Queckſilber in eben dem Grade erkälten.

Zur Ermittelung der Spannkraft des Waſſerdampfes für Temperaturen, welche über 100° hinausgehen, gebraucht man eine heberförmig gebogene Glasröhre, deren längerer Schenkel oben offen iſt. In den kürzeren Schenkel bringt man das Waſſer, welches ſich in Dampf verwandelt, wenn man das Gefäß in ein Oelbad von einer Temperatur über 100° ſenkt. Der Dampf drückt das Queckſilber im geſchloſſenen Schenkel herab, ſo daß es im offenen ſteigen muß. Auf das Queckſilber in dieſem Schenkel wirkt aber auch der Druck der atmoſphäriſchen Luft. Addirt man daher zur Differenz des Queckſilberſtandes im offenen und geſchloſſenen Schenkel den gleichzeitig beobachteten Barometerſtand, ſo erhält man die Spannkraft des Waſſerdampfes. Man kann auch den kurzen Schenkel in eine feine Spitze ausziehen, das Waſſer auf dem Queckſilber eine Zeitlang kochen, damit es von der Luft befreit wird, und dann die Spitze zuſchmelzen. Schmilzt man auch den längeren Schenkel zu, ſo hat man einen Apparat, welchen Schmidt anwandte, um die Spannkraft des Waſſerdampfes unter 100° zu beſtimmen.

Für Temperaturen, welche bedeutend über 100° hinausgehen, iſt die Spannkraft des Waſſerdampfes genauer von Arago und Dulong vermittelſt des auf der folgenden Seite ſtehenden Apparates unterſucht worden.

Der Dampf wurde in einem ſtarken Keſſel k von Eiſenblech entwickelt. oo' iſt der Ofen, t eine Röhre, durch welche der Rauch entweicht, und r der Roſt. Zu Temperaturbeſtimmungen dienten

Digitized by Google



zwei mit Queckſilber gefüllte Flintenläufe p und q, von denen der eine in das Waſſer des Keſſels herabreichte, während der unterſte Theil des anderen ſich etwas oberhalb des Waſſerſpiegels befand. Das Queckſilber im Laufe p mußte die Temperatur des Waſſers, dasjenige im Laufe q aber die Temperatur des Dampfes annehmen. Um nun dieſe Temperaturen wahrnehmbar zu machen, wurde in jeden Lauf ein Thermometer eingeſenkt, deſſen Röhre oberhalb des Laufes horizontal umgebogen war. Da aber das Queckſilber im horizontalen Theile der Röhre offenbar eine geringere Temperatur hat als das Queckſilber im Laufe, ſo mußte dies berückſichtigt werden, zu welchem Behufe dieſer Theil der Röhre durch einen Waſſerſtrom auf conſtanter Temperatur erhalten wurde.

In dem gußeiſernen Gefäße g g′ befindet ſich bis zu n n′ Queckſilber und über dem letzteren Waſſer, das ſich durch die Röhre a b e′ bis zum Punkte e′ erſtreckt. Der Dampf entweicht aus dem Keſſel in die verticale Röhre e e′ und übt hier bei e′ gegen die Waſſerſäule einen Druck aus, der ſich auf das Queckſilber des Gefäßes g g′ und der Manometerröhre m m′ fortpflanzt. In Folge deſſen ſteigt das Queckſilber in dieſer Röhre, und die im oberen Theile derſelben befindliche

Digitized by Google

Luft wird zusammengepreßt. Aus dem Stande des Queckſilbers in der Manometerröhre, welche mit einer genauen Theilung verſehen iſt, läßt ſich dann die Spannkraft des Dampfes beſtimmen. Zuerſt wurde das Waſſer im Dampfkeſſel, um die atmoſphäriſche Luft daraus zu entfernen, eine Zeitlang im Kochen erhalten, wobei das Sicherheitsventil des Keſſels und die verticale Röhre e e′ offen waren. Alsdann wurden die Oeffnungen des Keſſels geſchloſſen und auf den Roſt des Ofens die noch nöthige Menge Brennmaterial gelegt. Sobald das Steigen des Queckſilbers im Manometer das Maximum erreicht hatte, wurde von dem einen Beobachter der Stand der Thermometer, von dem anderen der Stand des Manometers aufgezeichnet. Sodann waren noch einige Correctionen anzubringen, eine wegen der verticalen Höhe der Waſſerſäule vom Punkte e′ bis zum Queckſilberſpiegel n n′, eine zweite wegen der veränderlichen Höhe des Queckſilbers im Gefäße g g′. Der obere und untere Theil des letzteren ſtehen nun durch eine Glasröhre h h′ mit einander in Verbindung, in der ſich der Stand des Queckſilbers durch den getheilten Stab s, welcher mit einem beweglichen Schieber verſehen iſt, beſtimmen läßt.

Um eine Erwärmung des Waſſers im oberen Theile der Röhre b e′ zu verhüten, wurde ſie durch einen Waſſerſtrom auf conſtanter Temperatur erhalten. Auch die in der Manometerröhre befindliche Luft hatte eine conſtante Temperatur, da dieſe Röhre von einem Glascylinder umgeben war, durch den ein Waſſerſtrom ging.

Die folgende Tabelle enthält die Spannkraft des Waſſerdampfes von — 20° bis 100° C., ausgedrückt durch die Höhe der Queckſilberſäule, welche der Dampf zu tragen vermag. Dieſelbe iſt nach einer empiriſchen Formel berechnet, welche die Beziehung zwiſchen der Spannkraft und der Temperatur giebt und nach den von Dalton zwiſchen 0° und 100° gemachten Beobachtungen entwickelt worden iſt.

Grade.	Spannkraft des Dampfes in Millim.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.	Grade.	Spannkraft des Dampfes in Millim.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.
— 20	1,333	0,0018	3	6,123	0,0084
— 15	1,879	0,0026	4	6,523	0,0089
— 10	2,631	0,0036	5	6,947	0,0094
— 5	3,660	0,0050	6	7,396	0,0101
0	5,059	0,0069	7	7,871	0,0107
1	5,393	0,0074	8	8,375	0,0114
2	5,748	0,0078	9	8,909	0,0122

Digitized by Google

Grade.	Spannkraft des Dampfes in Millim.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.	Grade.	Spannkraft des Dampfes in Millim.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.
10	9,475	0,0129	33	36,188	0,0492
11	10,074	0,0137	34	38,254	0,0520
12	10,707	0,0146	35	40,404	0,0549
13	11,378	0,0155	36	42,743	0,0581
14	12,087	0,0165	37	45,038	0,0612
15	12,837	0,0170	38	47,759	0,0646
16	13,630	0,0186	39	50,147	0,0681
17	14,468	0,0197	40	52,998	0,0720
18	15,353	0,0209	41	55,772	0,0758
19	16,288	0,0222	42	58,792	0,0799
20	17,314	0,0235	43	61,958	0,08418
21	18,317	0,0250	44	65,627	0,08916
22	19,447	0,0265	45	68,751	0,09340
23	20,577	0,0281	46	72,393	0,09835
24	21,805	0,0297	47	76,205	0,1035
25	23,090	0,0314	48	80,195	0,10900
26	24,452	0,0334	49	84,370	0,11662
27	25,881	0,0353	50	88,743	0,12056
28	27,390	0,0374	60	144,660	0,19653
29	29,045	0,0396	70	229,070	0,31121
30	30,643	0,0418	80	352,080	0,47834
31	32,410	0,0440	90	525,280	0,71364
32	34,261	0,0465	100	760,00	0,03253

Die folgende Tafel giebt nach den Versuchen von Arago und Dulong die Spannkraft des Wasserdampfes für Temperaturen über 100° C. in Atmosphären an. Bekanntlich steht der mittlere atmosphärische Druck mit einer Queckfilberſäule von 76 Centimetern im Gleichgewichte.

Spannkraft in Atmosphären.	Entsprechende Temperaturen.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.	Spannkraft in Atmosphären.	Entsprechende Temperaturen.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.
1	100	1,033	6	160,2	6,198
1½	112,2	1,549	6½	163,48	6,714
2	121,4	2,066	7	166,5	7,231
2½	128,8	2,582	7½	169,37	7,747
3	135,1	3,099	8	172,1	8,264
3½	140,6	3,615	9	177,1	
4	145,4	4,832	10	181,6	10,33
4½	149,1	4,648	11	186,03	11,363
5	153,1	5,165	12	190,0	12,396
5½	156,8	5,681	13	193,7	13,429

Digitized by Google

Spannkraft in Atmosphären.	Entsprechende Temperaturen.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.	Spannkraft in Atmosphären.	Entsprechende Temperaturen.	Druck auf 1 Quad.-Cent. in Kilogr.
14	197,19	14,462	25	226,3	25,825
15	200,48	15,495	30	236,2	30,990
16	203,60	16,528	35	244,85	36,155
17	206,57	17,561	40	252,55	41,320
18	209,4	18,594	45	259,52	46,485
19	212,1	19,627	50	265,89	51,650
20	214,7	20,660			

106. Die Dämpfe verbreiten sich vermöge ihrer Elasticität ebenso im Raume, wie die Gase. Dem Mariotte'schen Gesetze zufolge nimmt die Spannkraft der Gase in demselben Verhältnisse zu, in welchem ihr Volumen verkleinert wird. Die Elasticität der Dämpfe läßt sich aber durch Verminderung ihres Volumens nicht so vergrößern. Wenn man eine gegebene Dampfmenge durch Compression verdichtet, um ihre Spannkraft zu erhöhen, so schlägt sich ein Theil derselben als tropfbare Flüssigkeit nieder, während der Rest seine frühere Spannkraft und Dichte behält. Ein gegebener Raum kann für eine gegebene Temperatur nur eine bestimmte Dampfmenge in sich aufnehmen, in der Art, daß jede Verminderung des Volumens einen Uebergang in tropfbare Flüssigkeit zur Folge hat. Man sagt dann, daß sich der Dampf für die gegebene Temperatur im Maximum der Spannkraft befinde. Die vorhergehenden Tabellen geben das Maximum der Spannkraft des Wasserdampfes für die entsprechenden Temperaturen an. Dieses Maximum tritt um so später ein, je höher die Temperatur ist; es wächst mit der Temperatur, aber in einem größeren Verhältniß als diese. Um diese Eigenschaft des Dampfes, welche ihn von den Gasen unterscheidet, vermittelst eines Versuches anschaulich zu machen, kann man einen Apparat anwenden, den wir schon kennen gelernt haben. Man fülle eine Barometerröhre zum Theil mit Quecksilber, entferne durch Kochen alle Luft daraus und gieße dann in den noch übrigen Raum der Röhre Aether. Kehrt man jetzt die Röhre um, und taucht sie in ein weiteres, mit Quecksilber gefülltes Rohr, so wird der Aether rasch in die Höhe steigen und im oberen Raume der Röhre theilweise verdunsten. Der Aetherdampf wird die Quecksilbersäule, welche sonst dem Barometerstande genau entsprechen müßte, um einen bestimmten Theil herabdrücken, welcher, vom Barometerstande abgezogen, die Spannkraft des Aetherdunstes giebt. Drückt man nun die Barometerröhre tiefer in das weitere Rohr hinab, so wird zwar das Volumen des Aetherdam-

Digitized by Google

pfes verkleinert, aber die Höhe der Queckſilberſäule bleibt unverändert. Die Elaſticität des Aetherdampfes hat ſich daher nicht vermehrt, ſondern es hat ſich ein Theil deſſelben in flüſſigen Aether verwandelt, deſſen Menge um ſo mehr zunimmt, je tiefer man die Röhre in das Queckſilber des weiteren Gefäßes hinabdrückt, je kleiner alſo der Raum wird, in welchem der Aetherdunſt abgeſperrt iſt. Hätte ſich in dem leeren Raume der Barometerröhre ſtatt des Aetherdunſtes Luft befunden, ſo würde ſich deren Elaſticität in demſelben Verhältniſſe vermehrt haben, in welchem ihr Volumen durch das Hinabdrücken der Barometerröhre verkleinert worden wäre. So lange der Dampf noch vom Maximum ſeiner Spannkraft entfernt iſt, verhält er ſich wie ein Gas und befolgt wie dieſes das Mariotte'ſche Geſetz. Hebt man beim vorigen Verſuche die Barometerröhre wieder in die Höhe, ſo nimmt die flüſſige Aetherſchicht immer mehr ab, und wenn ſie ſich wieder vollſtändig in Dampf verwandelt hat, ſo ſieht man, wie die Queckſilberſäule beim ferneren Heben der Röhre ſteigt, indem ſich der Dampf in dem hierdurch vergrößerten Raume der Röhre wie ein Gas ausdehnt. Wenn man Dünſte, die nicht mehr mit dem Waſſer, aus dem ſie hervorgingen, in Berührung ſind, erwärmt, ſo dehnen ſie ſich wie Gaſe für jeden Grad um 0,00366 ihres Volumens bei 0° C. aus, vorausgeſetzt, daß ſie unter einem unveränderlichen äußeren Drucke ſtehen. Sind ſie dagegen verhindert, ſich frei auszudehnen, ſo nehmen ſie bei einer Temperaturerhöhung um eben ſo viel an Spannkraft zu. Werden ſie aber abgekühlt, ſo ziehen ſie ſich ſo lange zuſammen, bis ihre Spannung das der veränderten Temperatur entſprechende Maximum erreicht hat. Hiervon kann man ſich auf dieſelbe Weiſe wie bei den Gaſen überzeugen.

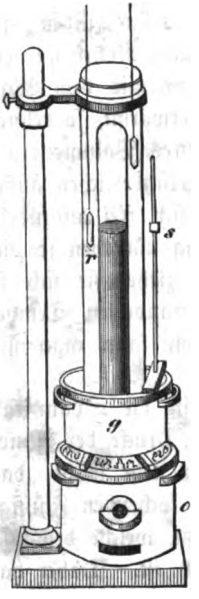
107. Für die Temperatur des Siedepunktes iſt die Spannkraft des Waſſerdampfes gerade ſo groß, daß ſie dem Drucke der Atmoſphäre das Gleichgewicht halten kann. Denn man ſieht leicht, daß ſich der Dampf nur dann aus dem Inneren einer kochenden Flüſſigkeit entwickeln kann, wenn er eine Spannkraft beſitzt, welche dem auf der Oberfläche der Flüſſigkeit laſtenden Drucke gleich iſt. Daher haben auch die Dämpfe aller Flüſſigkeiten für die Temperatur des Siedepunktes eine gleiche Spannkraft. Hierdurch wurde Dalton zu der Meinung geführt, daß die Dämpfe verſchiedener Flüſſigkeiten auch für eine gleiche Anzahl von Graden über oder unter dem Siedepunkt genau dieſelbe Spannkraft beſäßen. Wäre dieſes Geſetz richtig, ſo brauchte man nur den Siedepunkt irgend einer Flüſſigkeit zu kennen, um die Spannkraft ihres Dampfes vermittelſt einer Tafel für die

Digitized by Google

Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes zu bestimmen. Allein die Versuche einiger Physiker haben dargethan, daß dies bei größeren Entfernungen vom Siedepunkte merklich von der Wahrheit abweicht.

Die Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten haben im Allgemeinen für dieselbe Temperatur eine um so größere Spannkraft, je leichter die entsprechende Flüssigkeit siedet. So geben Schwefelkohlenstoff, Schwefeläther, schweflige Säure schon bei niedriger Temperatur Dämpfe von bedeutender Spannkraft, während Quecksilberdünste selbst bei 100° C. noch eine sehr geringe Spannkraft zeigen.

108. Zur Bestimmung der Dichtigkeit des Wasserdampfes wandte Gay Lussac ein Verfahren an, das in Beziehung auf Einfachheit und Genauigkeit vor allen anderen den Vorzug verdient. Er gebrauchte hierzu einen Apparat, welchen die Figur darstellt. o ist ein Ofen, auf welchem ein gußeisernes Gefäß g steht, das mit Quecksilber gefüllt ist. In das letztere taucht man eine graduirte, mit luftfreiem Quecksilber gefüllte Röhre, die sich innerhalb einer Glashülle befindet. Dieselbe ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, welche die Röhre r ganz umgiebt. Man füllt nun ein Glaskügelchen, das in eine feine Spitze ausgezogen ist, mit Wasser und läßt es, nachdem man die Spitze zugeschmolzen hat, durch das Quecksilber in den oberen Theil der Röhre aufsteigen. Durch glühende Kohlen, welche man in den Ofen bringt, wird nun der Apparat erwärmt, so daß sich das Wasser in dem Glaskügelchen ausdehnt und dieses zersprengt. In Folge des Druckes der Dämpfe aber, welche sich alsbald aus dem Wasser bilden, muß das Quecksilber in der Röhre r sinken. Nachdem das sämmtliche Wasser im obern Theil der Röhre r vollständig verdampft ist, muß man das Ganze noch eine Zeit lang auf constanter Temperatur erhalten, um die Beobachtungen gehörig anstellen zu können.



Hat man vorher das Glaskügelchen einmal leer und dann mit Wasser gefüllt gewogen, so ergiebt sich aus der Differenz beider Wägungen das Gewicht des Wassers und mithin auch das Gewicht des Dampfes, welcher sich oben in der Röhre r gebildet hat. Um das Volumen dieses Dampfes zu bestimmen, braucht man nur auf der

Digitized by Google

Röhre die Anzahl der Theilstriche zu beobachten, welche der Dampf einnimmt. Kennt man den Raum zwischen je zwei Theilstrichen der Röhre bei der Temperatur 0°, so ergiebt sich mit Rücksicht auf die Ausdehnung des Gases leicht der Raum zwischen zwei Theilstrichen für diejenige Temperatur, bei welcher die Beobachtung gemacht wurde. Die Temperatur des Dampfes und der Flüssigkeit in der Hülle erfährt man durch einige Thermometer. Die Spannkraft des Dampfes aber bestimmt man vermittelst eines getheilten Stabes, welcher durch ein Brettchen, das auf dem horizontal geschliffenen Rande des Gefäßes g liegt, vertical hindurchgeht. Diesen Stab kann man nun leicht so weit herunterschieben, daß sein unteres Ende gerade den Quecksilberspiegel im Gefäße berührt. Nachdem dies geschehen, rückt man den Schieber s genau in die Höhe der Quecksilberkuppe in der Röhre r, dann ist die Länge des Stabes vom Quecksilberspiegel bis zum Schieber gleich der Höhe der Quecksilbersäule in der Röhre. Reducirt man diese Höhe auf 0° und zieht man sie von dem auf 0° reducirten Barometerstande ab, so erhält man die Spannkraft des Dampfes.

Auf diese Weise kommen wir zu dem Gewichte eines gegebenen Volumens Dampf bei einer bekannten Temperatur und bei einem bekannten Druck, woraus sich ohne Weiteres das Gewicht eines Cubikcentimeters Dampf ergiebt. Vergleichen wir nun gleiche Volumina Luft und Wasserdampf mit einander, so erfahren wir das Verhältniß der Dichte des Wasserdampfes zur Dichte der Luft. Nach den Betrachtungen aber, welche wir im §. 100 angestellt haben, läßt sich leicht das Gewicht eines Cubikcentimeters Luft berechnen, welche demselben Druck und derselben Temperatur ausgesetzt ist, wie 1 Cbkctr. Wasserdampf. Gay Lussac hat die Dichtigkeit des Wasserdampfes gleich $^5/_8$ von der Dichte der Luft gefunden. Nach §. 100 wiegt 1 Cubkctr. Luft bei 0° und einem Druck von 760 Millimeter 0,001299 Gramm. Erhöht man nun die Temperatur dieses Cubikcentimeters Luft von 0° auf 100°, so werden aus ihm nach dem Ausdehnungsgesetze der Luft 1,375 Cubikcentimeter. Also nehmen auch 0,001299 Gr. Luft einen Raum von 1,375 Cubikcentimeter ein, woraus folgt, daß 1 Gr. Luft einen Raum von $\frac{1,375}{0,001299} = 1058,47$ Cubkctr. erfüllt. Demnach nimmt 1 Gr. Wasserdampf von 100° und 760 mm Spannkraft einen Raum von $1058,47 . \frac{8}{5} = 1693,55$ Cubikcentimeter ein, d. h. 1 Cubikcentimeter Wasser nimmt als Dampf von 100° einen beinahe 1700 Mal größeren Raum ein.

Digitized by Google

109. Bezeichnet man das Volumen irgend eines Gases bei einem bestimmten Drucke und bei der Temperatur 0° C. durch v, so ist bekanntlich für die Temperatur t das Volumen des Gases $v + v\alpha t - v(1 + \alpha t)$, wenn α den Ausdehnungscoefficienten des Gases bedeutet. Ebenso ist für irgend eine andere Temperatur t' das Volumen desselben Gases $v(1 + \alpha t')$. Bezeichnen nun p und p' die Spannkraft des Gases bei den Temperaturen t und t', so hat man unter der Voraussetzung, daß die Dichte unverändert bleibt, $p : p' = 1 + \alpha t : 1 + \alpha t'$. Entsprechen aber den Temperaturen t und t' verschiedene Dichtigkeiten, so hat man nach dem Mariotte'schen Gesetze, wenn man die Spannkräfte wieder durch p und p' bezeichnet, $p : p' = d : d'$ und daher auch $p : p' = d(1 + \alpha t) : d'(1 + \alpha t')$. (1)

Sind p und d die Spannkraft und Dichte des Gases bei der Temperatur $t = 0°$, so ist $p : p' = d : d'(1 + \alpha t')$ und $p' = \frac{p}{d} \cdot d'(1 + \alpha t')$ oder, wenn man $\frac{p}{d} = c$ setzt und bei p' und t' die nun überflüssigen Accente wegläßt, $p = c\,d'(1 + \alpha t)$. Diese Formel drückt die Spannkraft irgend eines Gases als Function der Dichte und der Temperatur aus.

Wenden wir nun die Proportion (1) auf Wasserdampf an, unter der Voraussetzung, daß sich dieser bis zum Maximum seiner Spannkraft wie ein Gas verhält. Gesättigter Wasserdampf übt auf die Wände des Gefäßes, worin er enthalten ist, einen Druck von 760 Millimeter aus. Ist nun dieser Dampf mit dem Wasser, aus dem er entstanden, nicht mehr in Berührung, so muß seine Spannkraft durch Erhöhung der Temperatur verstärkt werden, wenn er sein Volumen nicht vergrößern kann. Die Temperatur des Dampfes steige nun von 100° auf T°, dann verwandelt sich die obige Proportion, da für $t = 100°$ $p = 760$ mm und $t' = T$ ist, in $760 : p = d(1 + 100\alpha) : d'(1 + \alpha T)$, woraus folgt $d' = \frac{p}{760} \cdot \frac{d(1 + 100\alpha)}{1 + \alpha T}$.

Vermittelst dieser Formel läßt sich die Dichtigkeit des Wasserdampfes für irgend einen Druck p und für eine beliebige Temperatur T berechnen, wenn die Dichte d bei 100° und bei einem Drucke von 760 mm bekannt ist. Der Ausdehnungscoefficient α ist dabei nach

Digitized by Google

Gay Luſſac gleich 0,00375. Auf dieſe Weiſe hat man die folgende Tafel berechnet, welche die Dichte und das Volumen des Waſſerdampfes im Maximum der Spannkraft von — 20° bis 100° enthält, wobei die Dichte und das Volumen des Waſſers für 0° als Einheit angenommen iſt.

Temperatur.	Spannkraft in Millim.	Dichtigkeit.	Volum.	Temp.	Spannkraft in Millim.	Dichtigkeit.	Volumen.
—20°	1,333	0,00000154	650588	26	24,452	0,00002376	42084
—15	1,879	212	470898	27	25,881	2507	39895
—10	2,631	292	342984	28	27,390	2643	37838
— 5	3,660	398	251358	29	29,045	2794	35796
0	5,059	540	182323	30	30,643	2938	34041
1	5,393	573	174495	31	32,410	3097	32291
2	5,748	609	164332	32	34,261	3263	30650
3	6,123	646	154842	33	36,188	3435	29112
4	6,523	686	145886	34	38,254	3619	27636
5	6,947	727	137488	35	40,404	3809	26253
6	7,396	772	129587	36	42,743	4017	24897
7	7,871	818	122241	37	45,038	4219	23704
8	8,575	867	115305	38	47,579	4442	22513
9	8,909	919	108790	39	50,147	4666	21429
10	9,475	974	102670	40	52,998	4916	20343
11	10,074	0,00001032	99202	41	55,772	5156	19396
12	10,707	1092	91564	42	58,792	5418	18459
13	11,378	1157	86426	43	61,958	5691	17572
14	12,087	1224	81686	44	65,527	6023	16805
15	12,837	1299	77008	45	68,751	6274	15938
16	12,630	1372	72913	46	72,393	6585	15185
17	14,468	1451	68923	47	76,205	6910	14472
18	15,353	1534	65201	48	80,195	7242	13800
19	16,288	1622	61654	49	84,370	7602	13154
20	17,314	1718	58224	50	88,743	7970	12546
21	18,317	1811	55206	60	144,660	0,00012599	7937
22	19,417	1914	52260	70	229,070	19355	5167
23	20,577	2021	49487	80	352,080	28889	3462
24	21,805	2133	46877	90	525,280	41891	2387
25	23,090	2252	44411	100	760,000	58955	1696

Auch der folgenden Tafel liegt die obige Formel zu Grunde und die Dichte und das Volumen des Waſſers bei 0° iſt wieder als Einheit angenommen.

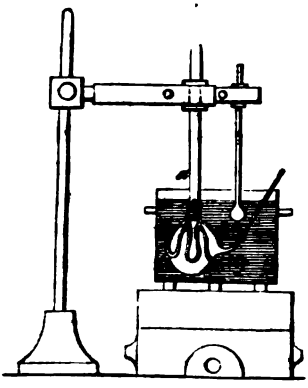
Digitized by Google

Temperatur.	Spannkraft in Atmos.	Dichtigkeit.	Volumen.	Temperatur.	Spannkraft in Atmos.	Dichtigkeit.	Volumen.
100	1	0,0005895	1696	186,03	11	0,0052557	190,27
112,2	1½	0,0008563	1167,8	190,0	12	0,0056834	175,96
121,4	2	0,0011147	897,09	193,7	13	0,006107	163,74
128,8	2½	0,0013673	731,39	197,2	14	0,006527	153,10
135,1	3	0,0016150	619,19	200,5	15	0,006944	144,00
140,6	3½	0,0018589	537,96	203,6	16	0,007359	135,90
145,4	4	0,0020997	476,26	206,6	17	0,007769	128,71
149,1	4½	0,0023410	427,18	209,4	18	0,008178	122,28
153,1	5	0,0025763	388,16	212,1	19	0,008583	116,51
156,8	5½	0,0028091	355,99	214,7	20	0,008986	114,28
160,2	6	0,0030402	328,93	226,3	25	0,010968	91,17
163,5	6½	0,0032683	305,98	236,2	30	0,012903	77,50
166,5	7	0,0034911	286,12	244,8	35	0'014663	68,20
169,4	7½	0,0037217	268,82	252,5	40	0,016644	60,08
172,1	8	0,0039434	253,59	259,5	45	0,018497	54,06
177,1	9	0,0043865	227,98	265,9	50	0,020306	49,32
181,6	10	0,0048226	207,36				

Mit Erhöhung der Temperatur des gesättigten Wasserdampfes wächst sowohl seine Dichte als seine Spannkraft, jedoch die erstere nicht ganz so schnell als die letztere. Ueber die Zunahme der Dichte des gesättigten Wasserdampfes hat Cagniard La Tour einen interessanten Versuch angestellt. Er füllte eine starke Glasröhre bis zu ¾ ihres Inhaltes mit Wasser, entfernte aus diesem alle Luft und schmolz dann die Röhre zu. Wurde nun diese Röhre einer immer steigenden Temperatur ausgesetzt, so verwandelte sich zuletzt das Wasser völlig in Dampf, so daß die Röhre leer zu sein schien. Sank aber die Temperatur um etwas, so kam die Flüssigkeit wieder zum Vorschein. Erhöht man die Temperatur des gesättigten Wasserdampfes bis zum Schmelzpunkte des Zinks, so nimmt er nahe einen 4 Mal so großen Raum ein als im tropfbarflüssigen Zustande, woraus man schließen kann, daß gesättigter Wasserdampf bei einer Temperatur von etwa 1500° C. eine eben so große Dichtigkeit als das Wasser selbst haben muß.

110. Gewöhnlich bestimmt man die Dichtigkeit der Dämpfe verschiedener Flüssigkeiten nach einem Verfahren, welches von Dumas herrührt. Ein Ballon, der in eine feine Spitze ausgezogen ist, wird, wie die Figur andeutet, an einem Halter a befestigt, mit der Flüssigkeit zum Theil gefüllt und dann in einem Wasser- oder Oelbade erhitzt. Dadurch geräth die Flüssigkeit in's Kochen und es bilden sich

Digitized by Google



Dämpfe, welche mit Heftigkeit aus der feinen Spitze hervorströmen. Wenn kein Dampf mehr entweicht, in welchem Falle sämmtliche Flüssigkeit im Ballon verdampft ist, schmälzt man die Spitze vor dem Löthrohre zu und bemerkt sich zugleich den Stand des Thermometers im Bade und den Barometerstand. Hat man nun den Ballon früher, mit trockner Luft gefüllt, gewogen, so ergiebt sich aus der Differenz der Gewichte des mit trockner Luft und des mit Wasserdampf gefüllten Ballons, wie viel der Dampf bei gleichem Volumen mehr wiegt, als die trockne Luft. Das Gewicht der letzteren erhält man, wenn man das Volumen des Ballons mit dem Gewichte eines Cubikcentimeters trockner Luft, auf die Temperatur und den Barometerstand reducirt, bei denen die erste Wägung des Ballons stattfand, multiplicirt. Die Dichtigkeit des Dampfes erfährt man aber durch Division seines absoluten Gewichts und des Gewichtes eines gleichen Volumens Luft von derselben Temperatur und Spannkraft.

Die gesättigten Dämpfe der verschiedenen Flüssigkeiten nehmen ähnlich wie der Wasserdampf mit steigender Temperatur an Dichte zu. Cagniard La Tour hat hierüber mit einigen Flüssigkeiten, namentlich mit Weingeist, Aether und Schwefelkohlenstoff, Versuche angestellt, wobei er sich einer starken, zum Theil mit Quecksilber gefüllten Glasröhre von nebenstehender Gestalt bediente. Im oberen Theile des längeren Schenkels war trockne Luft, im oberen Theile des kürzeren aber die Flüssigkeit. Dieser Apparat wurde nun mit seinem unteren Theile in ein Oelbad gebracht, wodurch sich die Flüssigkeit in Dampf verwandelte, dessen Spannkraft sich aus dem Unterschiede des Quecksilberstandes in beiden Schenkeln und aus der Compression der Luft im längeren Schenkel ermitteln ließ. Aus den Versuchen ging hervor, daß sich die Dämpfe bei starker Verdichtung nicht mehr nach dem Mariotte'schen Gesetze richten. So zeigte der Aether bei 200° eine Spannkraft von 37 Atmosphären, während sie nach dem erwähnten Gesetze 3. 37 Atmosphären betragen müßte. Dagegen ist die

Digitized by Google

Dichte des gesättigten Aetherdampfes bei jener Temperatur fast 3 Mal größer als diejenige, welche nach dem Mariotte'schen Gesetze einer Spannkraft von 37 Atmosphären entspricht.

111. Wir wissen, daß die Dämpfe, so lange sie ihren Sättigungspunkt noch nicht erreicht haben, bis zu einem gewissen Grade comprimirt und erkaltet werden können, ohne sich in tropfbare Flüssigkeit zu verwandeln. Befinden sie sich aber im Maximum ihrer Spannkraft, so reicht der geringste Druck oder die geringste Erkaltung hin, ihre Condensation herbeizuführen. Auch Gase, welche man früher zu den sogenannten permanenten Gasarten zählte, können durch Druck und Erkaltung tropfbarflüssig gemacht werden, wie Davy und Faraday gezeigt haben. Um verschiedene Gase durch ihren eigenen Druck zu condensiren, bedienten sich die Genannten einer starken, in der Mitte gebogenen Glasröhre, die an einem Ende zugeschmolzen war. Bringt man z. B. in diese Röhre etwas Cyanqueckſilber und

schmilzt man dann auch das andere Ende zu, so entsteht aus jenem, wenn man das Ende a vermittelst einer Spiritusflamme vorsichtig erhitzt, eine große Menge Cyangas, welches sich am anderen Ende verdichtet, besonders wenn man das letztere in eine Kältemischung steckt. Auf ähnliche Weise kann man auch Schwefelwasserstoffgas condensiren, wenn man eine starke Glasröhre zum Theil mit Wasserstoffschwefel füllt, einer Flüssigkeit, welche sich allmälig von selbst in Schwefel und Schwefelwasserstoff zersetzt. Auch Chlor, Ammoniak, die Dämpfe von schwefliger Säure und Salzsäure sind auf eine derartige Weise flüssig gemacht worden.

Thilorier hat vermittelst eines von ihm construirten Apparates in kurzer Zeit 1 Liter flüssige Kohlensäure dargestellt. Nach seinen Versuchen hat der Dampf dieser Säure bei 0° schon eine Spannkraft von 36 und bei 30° eine Spannkraft von 73 Atmosphären. Die Anwendung des Thilorier'schen Apparates ist mit Gefahr verbunden, da leicht eine Explosion bei ihm eintreten kann. Dagegen hat Natterer in Wien einen sehr zweckmäßigen und sicheren Apparat construirt, um die Kohlensäure zu einer tropfbaren Flüssigkeit zu verdichten. An ein metallenes Rohr ist eine starke Flasche von Schmiedeeisen geschraubt, welche auf ähnliche Weise wie ein Windbüchsenkolben eingerichtet ist. An der Stelle nämlich, wo das Rohr eingeschraubt ist, befindet sich ein Ventil, welches sich nach innen öffnet und nach außen schließt. Das Rohr hat eine Oeffnung, von der ein

Digitized by Google

Schlauch zu einem mit Kohlensäure gefüllten Gasometer führt. Eine Kolbenstange, welche sich im Rohre befindet, wird vermittelst eines Schwungrades und einer Kurbel in Bewegung gesetzt und dadurch das Gas in die Flasche gepumpt. Auf den oberen Theil der Flasche ist ein eiserner Aufsatz aufgeschraubt, an dem sich ein Hahn und eine mit einer feinen Oeffnung versehene Röhre befindet. Zunächst werden nun etwa 20 bis 30 Umdrehungen gemacht, um die in der Flasche enthaltene atmosphärische Luft vermittelst der Kohlensäure durch den erwähnten Hahn auszutreiben. Alsdann schließt man den Hahn und pumpt von Neuem Kohlensäure ein, um sie durch ihren eigenen Druck zu verdichten. Stickstoffoxydul kann gleichfalls durch diesen Apparat tropfbar gemacht werden.

Bis jetzt ist es nicht gelungen, andere Gase als die erwähnten in die tropfbare Form zu bringen. Dies kann nun entweder darin liegen, daß die bisher hervorgebrachten Druck- und Temperaturerniedrigungen dazu nicht hinreichend waren, oder auch darin, daß die Natur dieser Gase eine Condensation derselben überhaupt unmöglich macht. Wir werden hierauf zurückkommen.

112. Wenn man das Kochen einer Flüssigkeit in einem Glasgefäße beobachtet, so sieht man an den Wänden desselben feine Bläschen aufsteigen, welche allmälig größer werden und zuletzt zerplatzen. Diese Dampfblasen haben während ihres Aufsteigens sowohl den Druck der umgebenden Flüssigkeit als auch den auf der Oberfläche der letzteren lastenden Luftdruck auszuhalten. Daher muß der Flüssigkeit so viel Wärme zugeführt werden, daß die Spannkraft der entstandenen Dämpfe den erwähnten Hindernissen das Gleichgewicht halten kann. Die Flüssigkeit wird demnach auch um so später sieden, je höher die Flüssigkeitssäule im Gefäß und je höher der Barometerstand ist. So siedet das Wasser am Meeresspiegel bei einem mittleren Druck von 760 Millimeter bei 100°, in Quito schon bei 90° und auf dem Montblanc bei 86,5°. An den letztgenannten Orten kann man daher manche Stoffe, wie z. B. das Fleisch, nicht mehr hinreichend weich kochen. Je mehr man den Druck, welcher auf der Oberfläche der Flüssigkeit lastet, vermindert, desto geringer ist die Temperatur, bei welcher das Wasser siedet. Im luftleeren Raume siedet deshalb auch das Wasser bei jeder Temperatur und zwar eben so lebhaft als im Freien über einem starken Feuer. Sobald sich aber der leere Raum mit Wasserdampf angefüllt hat, hört das Kochen auf, weil der Druck desselben nun die Dampfbildung nicht mehr gestattet.

Digitized by Google

Durch Entfernung der schon entwickelten Dämpfe läßt sich aber das Sieden alsbald wieder hervorrufen. Man fülle einen Ballon, der einen etwas langen Hals hat, zum Theil mit Wasser, entferne daraus durch Kochen des letzteren die Luft und verschließe dann den Hals luftdicht vermittelst eines Korkes. Kehrt man jetzt das Gefäß um und gießt auf die Kugel kaltes Wasser, so wird das Sieden des Wassers sogleich mit großer Lebhaftigkeit beginnen. Durch das kalte Wasser wird nämlich der im oberen Theile des Ballons befindliche Dampf condensirt und daher auch der Druck der letzteren aufgehoben. Wenn aber die über der Flüssigkeit befindlichen Dämpfe nicht entfernt werden, so kann man das Wasser bis zu sehr hohen Temperaturen erwärmen, ohne daß es kocht, wie der Papin'sche Topf zeigt. Dieser besteht aus einem starken, fest verschließbaren cylindrischen Gefäße von Messing oder Kupfer, welches mit einem Sicherheitsventil versehen ist, das einen sehr starken Druck aushalten kann. Der Druck des über dem Wasser befindlichen Dampfes kann auf mehrere Atmosphären gebracht werden, wodurch das Kochen des noch vorhandenen Wassers gänzlich verhindert wird. Sobald man das Ventil öffnet, strömen die Dämpfe mit einer außerordentlichen Heftigkeit hervor, wobei die Temperatur des Wassers wieder auf 100° herabsinkt. Der Papin'sche Topf wird auch Digestor genannt, weil man darin aus Knochen alle auflösbaren Substanzen herausziehen kann.

Die Schnelligkeit des Kochens hängt unter sonst gleichen Umständen von der Menge der Wärme ab, welche in einer gegebenen Zeit in die Flüssigkeit übergeht. Daher sind auch die Natur und Dicke der Gefäßwände von Einfluß. In einem Gefäße aus Metall kocht das Wasser schneller als in einem Gefäße aus Glas. Die Dampfbläschen entwickeln sich aus der Flüssigkeit um so schwieriger, je größer die Cohäsion der Flüssigkeitstheilchen untereinander und je größer die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und den Gefäßwänden ist. Daher rührt das Aufstoßen und Aufwallen, welches man mitunter beim Kochen beobachtet. Es kann verhindert werden, wenn man einen Draht oder ein Blech oder auch Metallstückchen in das Glasgefäß bringt.

Wiewohl die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und den Gefäßwänden die Entwickelung der Dampfbläschen an den letzteren erschwert, so kann doch auch eine zu schwache Berührung zwischen der Gefäßwand und der Flüssigkeit dem Uebergange der Wärme in die letztere hinderlich sein. Wenn man in ein glühendes Platinschälchen

Digitized by Google

oder auf ein heißes Eisen einen Wassertropfen fallen läßt, so geräth er unter Beibehaltung seiner Kugelgestalt in eine drehende Bewegung, ohne das Phänomen des Kochens darzubieten. Man kann allmälig eine größere Wassermenge in's Schälchen gießen, ohne ein Sieden derselben wahrzunehmen, wenn man nur das Schälchen durch eine Spiritusflamme hinreichend glühend erhält. Läßt man aber das Schälchen etwas erkalten, so fängt das Wasser alsbald zu kochen an und zwar mit einer ungewöhnlichen Heftigkeit, so daß es sich oft unter einer Explosion in Dampf verwandelt. Dieser Versuch wurde zuerst von Leidenfrost angestellt. Der Grund der Erscheinung liegt vermuthlich darin, daß zwischen dem glühenden Metalle und dem Wasser eine zu geringe Berührung stattfindet. Während an dem Punkte, wo sich der Tropfen dem Metalle am meisten nähert, eine geringe Dampfbildung vor sich geht, geräth der Tropfen in eine rotirende Bewegung, wodurch eine gleichzeitige Berührung mehrerer seiner Punkte mit dem Metalle verhindert wird. Auch will Person zwischen dem Wasser und dem glühenden Metalle einen meßbaren Abstand bemerkt haben. Der Dampf entsteht aber nur insofern, als sich die Wärme mit den Theilchen der Flüssigkeit verbindet. Kann nun der letzteren die zum Kochen nöthige Wärmemenge nicht zugeführt werden, oder ist die Verbindung zwischen der Flüssigkeit und der Wärme, vielleicht wegen zu großer Abstoßung zwischen den Theilchen der letzteren selbst, unmöglich, so muß die Dampfbildung unterbleiben. Sobald die Hitze des Metalles nachläßt, tritt eine innigere Berührung desselben mit dem Tropfen ein, dem letzteren theilt sich eine große Wärme mit und die Dampfbildung geht daher rasch von Statten. Eine hierhergehörige Beobachtung hat auch Perkins gemacht. Wenn sich nämlich die Wände eines Dampfkessels im Zustande des Rothglühens befinden, kann man mehrere kleine Oeffnungen in denselben machen, ohne daß die Dämpfe daraus entweichen. Beim Sinken der Temperatur strömt dagegen der Dampf mit großer Heftigkeit hervor. —

Die Siedepunkte verschiedener Flüssigkeiten sind bei demselben Drucke verschieden. So ist der Siedepunkt bei einem Barometerstand von 28″ oder 760 mm:

Für schweflige Säure .	— 10°
„ Cyangas . . .	— 18°
„ Salzäther . . .	12°
„ concentrirte Salzsäure	20°
„ salpetrige Säure .	28°
„ Schwefeläther . .	37°

Digitized by Google

Für	Vitriolöl . . .	45°
"	Alkohol	79°
"	Salpeterſäure . .	86°
"	Terpentinöl . .	157°
"	Phosphor . . .	290°
"	Schwefel . . .	299°
"	Schwefelſäure . .	310°
"	Leinöl	316°
"	Queckſilber . . .	350°.

Wenn im Waſſer ein Salz aufgelöſt iſt, ſo findet das Sieden bei einer höheren Temperatur als bei reinem Waſſer ſtatt, da vorerſt die Anziehung zwiſchen denſelben durch die Wärme aufgehoben werden muß. So erhöhen alle löslichen Salze den Siedepunkt des Waſſers. Legrand hat eine große Anzahl von Verſuchen angeſtellt, um die Salzmenge zu beſtimmen, welche zu 100 Theilen Waſſer geſetzt werden muß, um die Temperatur des Siedepunktes um 1, 2, 3, . . Grad zu erhöhen. Uebrigens iſt die Temperatur der Dämpfe, welche ſich aus einer ſiedenden Salzlöſung entwickeln, gleich der Temperatur der Dämpfe, welche reines Waſſer liefert.

Wenn zwei Flüſſigkeiten, die keine chemiſche Verwandtſchaft zu einander haben, mit einander gemengt werden, ſo iſt die Temperatur des Siedepunktes der Miſchung etwas höher als der Siedepunkt der flüchtigſten von beiden, wenn dieſe unterhalb der anderen liegt. Befindet ſich dagegen die letztere oben, ſo verdampft ſie unabhängig von der anderen. Im vorigen Falle kann nämlich die flüchtigere Flüſſigkeit erſt dann ſieden, wenn ihre Dämpfe eine Spannkraft erlangt haben, welche dem auf ihr laſtenden Drucke das Gleichgewicht halten kann. Der Siedepunkt des Waſſers wird durch Alkohol erniedrigt, durch Schwefelſäure aber erhöht. Auch bei Flüſſigkeiten, welche ſich chemiſch verbinden, ändert ſich der Siedepunkt je nach dem Verhältniſſe der Miſchung.

113. Wenn verſchiedene gasförmige Körper in einem gegebenen Raume zuſammengebracht werden, ſo lagern ſie ſich nicht wie tropfbare Flüſſigkeiten, nach ihren ſpeciſiſchen Gewichten über einander, ſondern ſie verbreiten ſich gleichförmig in einander, wie dies z. B. beim Sauer- und Stickſtoff der Atmoſphäre der Fall iſt, obgleich beide von verſchiedenem ſpecf. Gewichte ſind. Verbindet man nach Berthollet zwei Ballons, von denen der eine mit Waſſerſtoffgas, der andere mit Kohlenſäure gefüllt iſt, durch eine Röhre, die vermittelſt eines Hahnes geſperrt werden kann, und giebt man dem Apparate eine

Digitized by Google

solche Stellung, daß der mit Wasserstoffgas gefüllte Ballon sich über dem anderen befindet, so geht beim Oeffnen des Hahnes die Hälfte des leichteren Wasserstoffgases aus dem oberen Ballon in den unteren, während sich die schwerere Kohlensäure zur Hälfte in dem oberen Ballon ausbreitet. Jedes Gas verbreitet sich gleichförmig in dem Raume des anderen, so, als ob dieses nicht vorhanden wäre, indem jedes nur der zwischen seinen eigenen Theilchen bestehenden Spannkraft folgt. Die Theilchen des einen Gases verhalten sich hiernach passiv gegen die des anderen, nur bemerkt man, daß die Verbreitung des einen Gases in den Raum des anderen langsamer geschieht, als wenn dieser ganz leer gewesen wäre, so daß jedes Gas für das andere als mechanisches Hinderniß in Betracht kommt.

Nach Graham nennt man diese Erscheinung die Diffusion der Gase. Wenn ein Gas in einem Gefäße eingeschlossen ist, so hat es vermöge der Repulsion zwischen seinen einzelnen Theilchen das Bestreben, sich in die umgebende Luft zu verbreiten, während diese in das Gefäß einzudringen sucht. Wenn man daher eine offene Glasröhre an einem Ende mit einem porösen Körper, z. B. mit einem Stopfen von trocknem Gyps, verschließt und über Quecksilber mit Wasserstoffgas füllt, so entweicht dieses durch den Gypsstopfen, während atmosphärische Luft in die Röhre dringt. Das Quecksilber steigt in der letzteren immer höher. Senkt man aber die Röhre tiefer ein, damit das Niveau des Quecksilbers in der Röhre dem äußeren stets gleich bleibt, und vergleicht man nachher, wenn das Quecksilber in der Röhre nicht mehr steigt, das Volumen der eingedrungenen Luft mit dem anfänglichen Volumen, welches das Wasserstoffgas einnahm, so verhält sich jenes zu diesem wie die Quadratwurzel aus der Dichte des Wasserstoffgases zur Quadratwurzel aus der Dichte der Luft. Daher verhalten sich auch die Geschwindigkeiten, mit welchen die Gase den Stopfen durchdringen, umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus ihren Dichtigkeiten.

114. Unter dem Drucke der Atmosphäre werden Gase auf der Oberfläche fester Körper und, falls sie porös sind, auch in deren Innerem verdichtet. Am auffallendsten ist diese Erscheinung, die sogenannte Absorption der Gase, bei einer porösen, ausgeglühten Kohle. Ein Versuch läßt sich am besten anstellen, wenn man eine unten offene, oben verschlossene Glasröhre mit Quecksilber füllt und in ein Gefäß mit Quecksilber stellt. Man läßt dann eine glühende Buchsbaumkohle, nachdem sie unter dem Quecksilber abgelöscht worden, in der Röhre aufsteigen, deren oberer Theil mit einem Gase,

Digitized by Google

z. B. mit Kohlensäure, angefüllt ist. In kurzer Zeit ist die Kohlensäure absorbirt, was sich daraus ergiebt, daß das Quecksilber beinahe den ganzen Raum der Röhre einnimmt, wenn das Volumen der Kohlensäure das 25fache von dem der Kohle war. Denselben Versuch kann man auch mit vielen anderen Gasen anstellen. So absorbirt 1 Raumtheil dieser Kohle 1,75 Raumtheile Wasserstoffgas, 7,5 Stickgas, 9,25 Sauerstoffgas, 65 schwefligsaures Gas, 85 Chlorwasserstoffgas, 90 Raumtheile Ammoniakgas und 35 R. Kohlensäuregas.

Bei geringerem Luftdrucke wird dem Volumen nach mehr, dem Gewichte nach aber weniger Gas absorbirt. Auch die Größe der Poren ist nicht ohne Einfluß, da in einer Kohle mit weiten Poren verhältnißmäßig weniger Gas verdichtet wird. Wenn man die Kohle unter die Luftpumpe bringt oder glüht, so werden die absorbirten Gase wieder frei. Bei höherer Temperatur ist die Absorption schwächer als bei niedrigerer. Befördert wird die Absorption, wenn man den festen Körper in einen fein vertheilten Zustand versetzt und dadurch die Berührungspunkte mit dem Gase vermehrt. So wird in einem Platinschwamm das Sauerstoffgas dergestalt verdichtet, daß er glühend wird und einen Strom von Wasserstoff entzündet, indem sich beide Gase mit einander verbinden. Uebrigens werden die Gase auch an ganz glatten, metallischen Oberflächen verdichtet. So kann selbst durch ein Stück Platin mit vollkommen metallischer Oberfläche, durch Gold und Palladium eine Verbindung heterogener Gase bewirkt werden, wenn man sie in ein Gemenge derselben taucht. Auch oxydirbare Metalle verdichten die Gase an ihrer Oberfläche, aber sie haben nicht das Vermögen, verschiedenartige Gase, wie Wasser- und Sauerstoff, mit einander zu verbinden. Nach Henry hat dies darin seinen Grund, daß die stärkere Verwandtschaft der Metalltheilchen zum Sauerstoff die Verbindung des letzteren mit dem Wasserstoff unmöglich macht. Das Glas bedeckt sich ebenfalls an seiner Oberfläche mit einer Luftschicht, welche in der Form von Bläschen fortgeht, wenn man luftfreies Quecksilber in einem Glasgefäße kocht. Dasselbe zeigt sich, wenn man ein Gefäß mit Quecksilber oder Wasser unter den Recipienten der Luftpumpe bringt.

Auf diese Weise ist jeder feste Körper von einer mehr oder weniger dichten Gasatmosphäre eingehüllt. Die Dämpfe werden wie die Gase an den Oberflächen fester Körper verdichtet und unter Umständen in den tropfbaren Zustand zurückgeführt, wie dies namentlich beim Chlorcalcium, beim Kochsalz, bei der Pottasche u. s. w. der Fall ist.

Digitized by Google

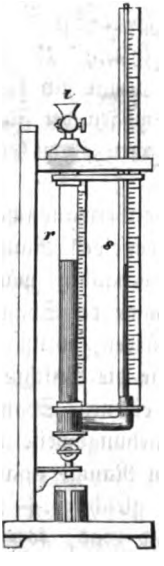
Auch zwischen tropfbaren Flüssigkeiten und Gasen besteht eine Anziehung, in Folge deren die letzteren von den ersteren an ihren Oberflächen verdichtet und wegen der leichten Verschiebbarkeit der Theilchen auch im Inneren absorbirt werden. Man kann darüber wieder mit Hilfe jener Glasröhre, die man in ein Gefäß mit Quecksilber bringt, Versuche anstellen, wenn man statt der Kohle Wasser in die Röhre aufsteigen läßt. Das Wasser absorbirt ein 500faches Volumen Chlorwasserstoff, ein 700faches Volumen Ammoniakgas und 1 Volumen Kohlensäure. Ebenso absorbirt es auch eine bedeutende Quantität atmosphärischer Luft, welche durch längeres Kochen wieder ausgetrieben wird. Das Absorptionsvermögen der Flüssigkeiten hängt sowohl von dem Drucke als auch von der Temperatur ab. Weil durch die Wärme die Abstoßung zwischen den einzelnen Gastheilchen erhöht wird, so ist die Absorption bei höherer Temperatur geringer als bei niedrigerer. Je stärker aber der Druck, desto bedeutender die Absorption. Wenn die Gase keine chemische Verwandtschaft zu der Flüssigkeit haben, so ist die Absorption bei gleicher Temperatur dem Drucke gerade proportional, in der Art, daß für jeden Druck ein gleiches Volumen aufgenommen wird. So absorbirt die Flüssigkeit bei einem doppelten Druck dasselbe Gasvolumen als beim einfachen, nur ist die Dichtigkeit des absorbirten Gases doppelt so groß. Sobald der Druck nachläßt, entweicht ein Theil des Gases wieder, so daß oft weniger davon in der Flüssigkeit zurückbleibt, als bei einfachem Drucke aufgenommen worden wäre, was wohl ohne Zweifel daher kommt, daß die rasch entweichenden Gastheilchen die anderen mit sich fortreißen. Im Allgemeinen ist auch das Absorptionsvermögen der Flüssigkeiten um so größer, je geringer die Cohäsion zwischen ihren einzelnen Theilchen ist.

115. Verschiedenartige Gase, die keine chemische Verwandtschaft zu einander haben, breiten sich nach §. 113 in demselben Raume gleichförmig aus, so, als ob jedes allein darin vorhanden wäre. Die Spannkraft des Gasgemenges ist gleich der Summe der Spannkräfte, welche die einzelnen Gase für sich zeigen würden, wenn sie dieselbe Temperatur und dasselbe Volumen hätten, wie die Mischung, da jedes Gas unbekümmert um das andere seiner eigenen Spannkraft folgt. Wenn daher zwei Gasarten, denen beziehungsweise die Spannkräfte p und p' zukommen, in einem gegebenen Raume zusammengerathen, so ist die elastische Kraft der Mischung gleich $p + p'$. Dasselbe gilt auch für eine Mischung von Dampf und Gas, so daß sich in einem gegebenen mit Luft erfüllten Raume eben so viel Dampf

Digitized by Google

bildet, als ob er ganz leer wäre, und die Spannkraft des Gemenges ist gleich der Summe der Spannkraft des Gases und der Spannkraft des Dampfes. Von diesem Satze kann man sich auch leicht durch den Versuch überzeugen.

Man tauche das offene Ende einer mit Quecksilber gefüllten Röhre in ein Gefäß mit Quecksilber und sehe nach, den wievielten Theil des Barometerstandes der Druck der im oberen Theile der Röhre befindlichen Luft beträgt. Alsdann bringe man von unten in den mit Luft gefüllten Theil der Röhre etwas Schwefeläther, welcher verdunsten und den Druck auf die Quecksilbersäule vermehren wird. Senkt man nun die Röhre so tief in das Quecksilber des Gefäßes hinab, daß der vom Quecksilber freie Raum wieder so groß als vorher ist, so befindet sich jetzt in dem Raume, welchen vorher die Luft einnahm, außer der letzteren auch noch der Aetherdampf. Es sei nun die Spannkraft der Luft für die Temperatur, bei welcher die Beobachtung gemacht wird, gleich a^{mm}, die Spannkraft des Aetherdampfes für dieselbe Temperatur gleich b^{mm}, dann ist die Summe $a + b$ dieser Spannkräfte gleich der Größe, um welche die Quecksilbersäule in der Röhre durch die Luft und den Aetherdampf herabgedrückt wird. Die Höhe der Quecksilberkuppe in der Röhre über dem Niveau des Quecksilbers im Gefäße muß demnach gleich der Differenz zwischen dem Barometerstande und jener Größe sein, was durch den Versuch vollkommen bestätigt wird.



Noch bequemer und auch für die Fälle geeignet, wo die in einem gegebenen Raume abgeschlossene Luft eine große Dichtigkeit besitzt, ist nebenstehender Apparat. Er besteht, wie die Figur zeigt, aus einer weiten, oben und unten mit einem Hahne versehenen Röhre, die mit einer zweiten, weniger weiten, aber längeren Röhre communicirt. Der obere Hahn hat nur eine kleine Höhlung, welche mit einem kleinen Trichter t in Verbindung gebracht werden kann, wenn man den Hahn dreht. Dieser letztere kann auch abgeschraubt werden, um vor dem Versuche einen Strom trockner Luft durch die Röhre streichen zu lassen. Gießt man nun in den langen, oben offenen Schenkel Quecksilber, so stellt sich dieses in beiden Schenkeln gleich hoch und die im oberen Theile der Röhre r befindliche Luft hat gerade den

Digitized by Google

Druck einer Atmosphäre auszuhalten. Man gieße jetzt in den Hahn t eine Flüssigkeit, etwa Wasser, und drehe ihn nach derselben Richtung um, dann wird bei jeder Umdrehung ein Tropfen in die Röhre r fallen und hier verdunsten. Durch den Druck der gebildeten Dämpfe sinkt das Quecksilber in dieser Röhre, während es in der anderen Röhre steigt. Nach einiger Zeit erreicht die Spannkraft der Dünste ein Maximum, welches eben so groß ist, als wenn sie sich im leeren Raume gebildet hätten. Gießt man nämlich in den Schenkel s so viel neues Quecksilber, bis das Gemenge aus Dampf und Luft wieder denselben Raum einnimmt, den zuvor die Luft allein inne hatte, so beobachtet man, daß das Quecksilber in der Röhre s über dem Niveau des Quecksilbers in der Röhre r um so viel höher steht als die Spannkraft des gesättigten Dampfes für die herrschende Temperatur ausmacht. Hieraus folgt denn, daß sich in einem gegebenen Raume eben so viel Dampf bildet als bei derselben Temperatur in einem eben so großen leeren Raume; nur hinsichtlich der Zeit, in welcher die Dampfbildung von Statten geht, bemerkt man einen Unterschied, indem sich die Dünste in einem lufterfüllten Raume langsamer als im leeren Raume bilden. Will man das Gemenge einem noch höheren Drucke aussetzen, so gießt man in den längeren Schenkel eine neue Menge Quecksilber nach; um aber das Gesetz für geringe Drucke zu prüfen, braucht man nur durch den unteren Hahn eine entsprechende Quecksilbermenge herausfließen zu lassen.

116. An der Oberfläche der Gewässer, welche unsere Erde bedecken, findet eine fortwährende Entwickelung von Dämpfen statt, welche sich in der Luft verbreiten, wie ein Gas in einem anderen. Sofern die Dampfbildung nur an der Oberfläche der Flüssigkeiten vorgeht, nennt man sie Verdunstung im Gegensatze zum Kochen, bei welchem sich auch aus dem Inneren der Flüssigkeit Dämpfe entwickeln.

Im Zustande der feinsten Vertheilung bildet der Wasserdampf mit der Luft ein gleichförmiges, inniges Gemenge, er erhöht dabei die Durchsichtigkeit der Atmosphäre und verstärkt den Luftdruck. Wenn man aber ein mit Dampf gesättigtes Luftquantum allmälig comprimirt, so wird ein Theil des Dampfes verdichtet, indem er als Nebel niederfällt. Geht die Compression noch weiter, so setzt sich der Dampf in der Form von Tropfen an den Gefäßwänden ab. Dasselbe geschieht, wenn durch eine hinreichende Temperaturerniedrigung die Spannkraft der Dämpfe vermindert wird. Wenn daher ein Körper in der mit Wasserdämpfen gesättigten Luft erkaltet, so setzen sich jene

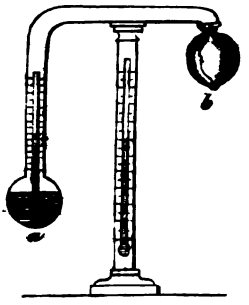
Digitized by Google

als Thautröpfchen darauf ab. Die Thaubildung geschieht gewöhnlich, wenn die Körper bei heiterem Himmel durch Ausstrahlung ihrer Wärme unter die Temperatur der umgebenden Luft abgekühlt werden. Es besteht aber hierin bei verschiedenen Körpern ein merklicher Unterschied. Ein Körper beschlägt sich um so leichter mit Thau, je größer sein Strahlungsvermögen ist. In windstillen und wolkenlosen Nächten bildet sich der meiste Thau, weil dann die Wärme, welche die Körper durch Ausstrahlung verloren haben, nicht so leicht wieder ersetzt wird. Deshalb ist auch in solchen Nächten die Temperatur des Bodens bedeutend geringer als in einer Höhe von etwa 50 Fuß, während bei bedecktem Himmel diese Temperaturdifferenz nicht stattfindet. —

Je ruhiger die Atmosphäre ist, desto langsamer geht die Verdunstung des Wassers von Statten, weil dann der Druck der über der Flüssigkeit sich ansammelnden Dämpfe als Hinderniß wirkt. Dies ist nicht der Fall bei bewegter Luft, wo immer neue Schichten, welche noch weniger mit Dampf erfüllt sind, mit der Flüssigkeit in Berührung kommen. Daher der Einfluß eines trocknen Windes auf die Lebhaftigkeit der Verdunstung. Dann geschieht auch die Verdunstung um so rascher, je weiter noch die Spannkraft der schon in der Luft vorhandenen Dämpfe von dem der herrschenden Temperatur entsprechenden Maximum entfernt ist. Es kann daher in einer ganz trocknen Luft bei einer niedrigen Temperatur eben so viel Wasser verdunsten als in derselben Zeit bei höherer Temperatur in einer solchen, welche schon Wasserdampf von einer gewissen Spannkraft enthält. Man nennt die Luft insgemein trocken, wenn sie noch weit von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist, feucht hingegen, wenn sie ihrem Sättigungspunkte sehr nahe ist, so daß die geringste Temperaturerniedrigung einen feuchten Niederschlag zur Folge hat. Mit dem Grade der Trockenheit oder Feuchtigkeit kennen wir aber noch nicht den absoluten Dunstgehalt der Luft, welcher von ihrer Temperatur abhängt. So kann die Luft z. B. im Winter bei einer niedrigen Temperatur und bei einem geringen Dunstgehalte sehr feucht sein, weil sich der letztere bei der herrschenden Temperatur im Maximum der Spannkraft und Dichte befindet, während die Luft im Sommer bei einem großen Dunstgehalte sehr trocken sein kann, weil sie für die herrschende Temperatur noch weit von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist. Zur Bestimmung des Wassergehaltes der Luft hat man verschiedene Apparate, welche unter dem Namen Hygrometer bekannt sind.

Digitized by Google

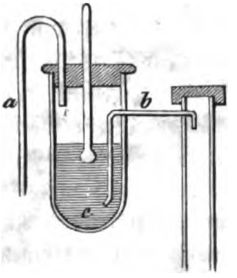
Daniell's Hygrometer besteht aus einem gekrümmten Glasrohre mit zwei Kugeln, von denen die eine a entweder vergoldet oder mit einer dünnen, glänzenden Platinschicht überzogen, die andere aber mit einem feinen Leinwandläppchen umwickelt ist. Die Kugel a dieses luftleeren Apparates ist zum Theil mit Aether gefüllt, in dem sich die Kugel eines kleinen Thermometers befindet. Tröpfelt man nun etwas Aether auf die Kugel b, so erkaltet dieselbe durch die Verdampfung des Aethers, wodurch der im Apparate befindliche Aetherdunst in dieser Kugel verdichtet wird. In der Kugel a entstehen aber dadurch neue Dünste, welche wieder auf die vorige Weise condensirt werden, u. s. f. Gleichzeitig sinkt aber auch die Temperatur der Kugel a, weil hier während der Bildung der Aetherdämpfe ebenfalls Wärme gebunden wird. Allmälig erkaltet die Kugel a so weit, daß sie sich von außen mit einem feinen Thau beschlägt. In diesem Moment beobachtet man das kleine Thermometer, welches die Temperatur anzeigt, bei der die Thaubildung eintritt. Für diese Temperatur ist die Luft, welche die Kugel a umgiebt, mit Feuchtigkeit gesättigt. Beträgt diese Temperatur z. B. 12°, so entspricht ihr nach der Tafel in §. 109 eine Spannkraft von 10,707 Millimeter und eine Dichtigkeit des Wasserdampfes von 0,00001092, so daß in einem Cubikmeter Luft bei dieser Temperatur 10,92 Gramm Wasserdunst enthalten sind. Wenn aber die wirkliche Temperatur der Luft 24° beträgt, so ist nach der angeführten Tabelle die entsprechende Spannkraft und Dichte des Wasserdampfes beziehungsweise 21,805 mm und 0,00002133. Die Luft kann also bei einer Temperatur von 24° im Zustande der Sättigung 21,33 Gr. Wasserdampf enthalten. Die Luft enthält mithin in unserem Falle nach den Angaben des Hygrometers 21,33 — 10,92 — 10,41 Gr. weniger Dünste, als sie bei dieser Temperatur in der That enthalten könnte, und wird deshalb trocken erscheinen. Die Temperatur, bei welcher die Verdichtung des Wasserdampfes in der Kugel a eben beginnt, nennt man den Thaupunkt. Man sieht aus dem Vorhergehenden, daß der Feuchtigkeitsgehalt der Luft um so größer ist, je geringer der Unterschied zwischen der Temperatur des Thaupunktes und der Temperatur der Luft ist. Um so eher wird dann auch Regen zu erwarten sein. Indessen hat man auch auf die

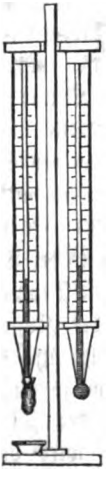


Digitized by Google

Schwierigkeiten aufmerksam gemacht, mit diesem Instrumente genaue Resultate zu erhalten, einmal, weil der Aether in der Kugel a an der Oberfläche kälter als in der Tiefe ist, zweitens, weil eine längere Anwesenheit des Beobachters in der Nähe des Apparates nöthig ist, wodurch sowohl die Temperatur als auch der Feuchtigkeitsgehalt der Luft eine Veränderung erleidet.

Döbereiner hat ein Hygrometer construirt, welches mit dem Daniell'schen auf demselben Princip beruht. Es besteht im Wesentlichen aus einem Gefäße von dünnem Messingblech, das außerhalb vergoldet ist. Dieses Gefäß ist mit einem beweglichen Deckel verschlossen, durch den eine gekrümmte Röhre a und ein Thermometer hindurchgeht. Die Röhre b geht beinahe bis auf den Boden des Gefäßes und communicirt mit einem Rohre, das wieder mit einer Druckpumpe in Verbindung steht. Wird nun in die Röhre b Luft eingepumpt, so tritt diese bei c aus und steigt in Form von Blasen durch den Aether auf, welcher rasch verdunstet und dadurch bewirkt, daß sich das Gefäß außen mit einem feinen Thau beschlägt. Da der Aether durch die Luftblasen in beständiger Bewegung erhalten wird, so hat er überall gleiche Temperatur. Uebrigens kann man auch die Luft durch eine mit Luft gefüllte Blase in das Gefäß treiben. Die mit Aetherdämpfen gesättigte Luft entweicht durch die Röhre a in's Freie.





August's Psychrometer (Naßkältemesser) besteht aus zwei übereinstimmenden Thermometern, die an demselben Gestelle befestigt sind. Die Kugel des einen ist mit Mousselin umhüllt, der in ein Schälchen mit Wasser hinabreicht, wodurch sie befeuchtet wird. Die Verdunstung, welche nun an dieser Kugel erfolgt, geht um so rascher von Statten, je weiter die Luft von ihrem Sättigungspunkte entfernt ist. Durch die Verdunstung wird Wärme gebunden, das Thermometer sinkt und zwar so lange, bis die umgebende Luft mit Wasserdämpfen gesättigt ist. Der Feuchtigkeitszustand der Luft ergiebt sich aus der Differenz beider Thermometer. Ist diese Differenz gleich Null, so ist die Luft mit Feuchtigkeit gesättigt und es kann daher an der

Digitized by Google

befeuchteten Kugel keine Verdunſtung ſtattfinden. Während des Gebrauches muß dieſes Inſtrument einem hinreichend ſtarken Luftzug ausgeſetzt ſein, damit die Dämpfe, welche die naſſe Kugel liefert, gehörig abgeführt werden. Das naſſe Thermometer zeigt die Temperatur an, bis zu welcher die Luft an der Kugel deſſelben erkaltet und für die ſie mit Feuchtigkeit geſättigt iſt. Während die Luft an dieſer Kugel vorbeiſtreicht, giebt ſie einen Theil ihrer Wärme zur Dampfbildung ab, die Dampfmenge aber, welche ſie aufnimmt, läßt ſich ohne merklichen Fehler der Temperaturdifferenz beider Thermometer proportional annehmen. Bezeichnet t die Temperatur des befeuchteten, t + d die des trocknen Thermometers, alſo d die Temperaturdifferenz beider Thermometer, ſo kann man die Dampfmenge, welche 1 Cbkmtr. Luft während ihres Vorbeiſtreichens an der naſſen Kugel aufnimmt, durch αd ausdrücken, wo α ein conſtanter Factor iſt, welcher durch Verſuche beſtimmt werden muß. Iſt nun M das Maximum der Spannkraft des Dampfes für die Temperatur t des naſſen Thermometers, e die zu ſuchende Spannkraft des Dampfes, welchen die Luft bei der Temperatur des trocknen Thermometers wirklich enthält, ſo findet man offenbar $M - e + \alpha d$ und hieraus $e = M - \alpha d$. Nach vergleichenden Verſuchen mit dem Daniell'ſchen Hygrometer und dem Pſychrometer iſt $\alpha = 0{,}65$.

Wenn das Pſychrometer genaue Reſultate liefern ſoll, ſo muß man auf der Theilung noch $^1/_{10}$ Grad unmittelbar ableſen können. Der Bequemlichkeit wegen hat man beſondere Tabellen berechnet, in denen man für jede Lufttemperatur und für die zugehörige pſychrometriſche Differenz den Waſſergehalt der Luft ohne Weiteres auffinden kann.

Viele organiſche Körper, wie Haare, Fiſchbein, Federkiele, Darmſaiten u. ſ. w. haben die Eigenſchaft, daß ſie ſich durch Aufnahme von atmoſphäriſcher Feuchtigkeit verlängern und beim Trocknen wieder verkürzen. Man nennt dieſe Körper deshalb hygroſkopiſche und hat ſie auch zur Conſtruction von Hygrometern benutzt, welche zwar den äußerſten Grad der atmoſphäriſchen Feuchtigkeit und Trockenheit, aber nicht die wahre Spannkraft des in der Luft enthaltenen Dampfes angeben. Das Hygrometer von Sauſſure beſteht aus einem in Kalilauge ausgekochten Menſchenhaar, welches an einem Ende befeſtigt und mit dem anderen um eine Rolle geſchlungen iſt, die ſich bei der Verkürzung des Haares dreht. Durch ein Gewichtchen, welches an einem Faden hängt, der in entgegengeſetzter Richtung um die Rolle geſchlungen iſt, wird eine Drehung im entgegengeſetzten Sinne hervorgebracht, wenn ſich das Haar verlängert. An

Digitized by Google

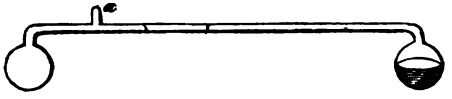
der Are der Rolle ist ein Zeiger befestigt, welcher während der Bewegung der ersteren auf einem Gradbogen spielt. In feuchter Luft verlängert sich das Haar, weil es viel Feuchtigkeit absorbirt, in trockner Luft verkürzt es sich, weshalb sich der Zeiger bald nach der einen, bald nach der anderen Seite bewegen muß. Um die festen Punkte der Scale, welche der Zeiger durchläuft, zu bestimmen, wird das Instrument zuerst unter eine Glasglocke gebracht, worin die Luft durch Chlorcalcium vollständig ausgetrocknet ist. Der Punkt der Scale, auf welchem sich der Zeiger feststellt, wird mit 0 bezeichnet. Hierauf bringt man es unter eine Glocke, welche durch Wasser abgesperrt ist und deren Wände noch mit destillirtem Wasser befeuchtet sind. Der innere Raum der Glocke sättigt sich hierdurch bald mit Feuchtigkeit und der Zeiger geht nach der anderen Seite der Scale. Der Punkt bei dem der Zeiger stehen bleibt, wird durch 100 bezeichnet und der Zwischenraum zwischen den beiden so bestimmten Punkten in 100 gleiche Theile getheilt. Will man dieses Instrument auch zur Ermittelung der in der Luft enthaltenen Wassermenge benutzen, so müssen die den einzelnen Feuchtigkeitsgraden entsprechenden Spannkräfte empirisch bestimmt werden. Verschiedene Haare, die auf verschiedene Weise zubereitet sind, zeigen ein ungleiches Verhalten gegen die Feuchtigkeit, und selbst ein und dasselbe Haar verändert im Laufe der Zeit seine Natur. Regnault hält es für zweckmäßig, die Haare durch Aether, anstatt durch Kalilauge zu entfetten.

Das Deluc'sche Hygrometer hat eine ähnliche Einrichtung wie das ebenerwähnte, nur ist statt des Haares ein dünner Streifen quer über die Fasern geschnittenen Fischbeins benutzt.

117. Wir wissen, daß bei der Dampfbildung Wärme gebunden wird. Wenn die Flüssigkeit über einem Feuer kocht, so liefert dieses die zur Entstehung des Dampfes erforderliche Wärme, und die zurückbleibende Flüssigkeit erhält sich dabei auf constanter Temperatur. Wenn aber die Verdampfung an der Oberfläche der Flüssigkeit ohne besonderen Wärmezufluß geschieht, so muß den unteren Schichten der Flüssigkeit selbst und der Umgebung die zur Dunstbildung nöthige Wärmemenge entzogen werden. Deshalb entsteht bei jeder Verdunstung Kälte und zwar um so mehr, je schneller sie von Statten geht, so daß dadurch unter Umständen ein Theil der Flüssigkeit zum Erstarren gebracht werden kann. Eine Flüssigkeit siedet aber um so rascher, je tiefer ihr Siedepunkt liegt; desto größer ist dann auch die durch die Verdunstung bewirkte Kälte. Man bringe unter den Recipienten der Luftpumpe ein flaches Gefäß mit Schwefelsäure und

Digitized by Google

darüber ein Schälchen mit Wasser. Verdünnt man nun die Luft, so geräth das Wasser bald in's Kochen und weil die gebildeten Dämpfe von der Schwefelsäure begierig absorbirt werden, so wird die Verdunstung dergestalt beschleunigt, daß das Wasser zu Eis erstarrt. Auch in Wollastons sogenanntem Kryophorus (Eisträger) gefriert das Wasser durch die Verdunstungskälte. Derselbe besteht aus zwei Glaskugeln, welche durch eine etwas lange Glasröhre mit einander verbunden sind. Man bringt in die Kugeln einiges Wasser, um durch Kochen desselben die Luft aus dem Apparate zu entfernen, worauf die Oeffnung a mittelst eines Löthrohres zugeschmolzen wird. Man läßt dann das Wasser in einer Kugel zusammenlaufen und taucht die andere in eine Kältemischung. Die Dämpfe, welche sich aus dem Wasser entwickeln, werden rasch in der anderen Kugel verdichtet, wodurch auch hier eine so lebhafte Verdunstung bewirkt wird, daß das Wasser gefriert. Wenn man die Kugel eines Thermometers mit einem Schwämmchen umwickelt und dieses mit Schwefelkohlenstoff oder mit flüssiger schwefliger Säure befeuchtet, so verdampft die Flüssigkeit so rasch, daß das Thermometer auf — 30° herabsinkt und das Quecksilber nach einiger Zeit selbst gefriert. Durch ein Gemisch von Aether und flüssiger Kohlensäure läßt sich sogar eine Temperaturerniedrigung von — 100° hervorbringen. Leitet man einen Strom flüssiger Kohlensäure in das Innere einer kleinen Glasphiole, so füllt sich die letztere wegen der außerordentlich raschen Verdunstung dieser Flüssigkeit fast ganz mit erstarrter Kohlensäure.



Hierher gehören auch die Alkarazas der Spanier, poröse Gefäße, welche dazu benutzt werden, um Wasser und andere Getränke kühl zu erhalten. Indem die Flüssigkeit durch die Poren dringt und an den äußeren Gefäßwänden verdunstet, erhält sich die Flüssigkeit auf einer Temperatur, welche geringer ist als die der umgebenden Luft. Auch an der Oberfläche der Pflanzen und warmblutigen Thiere findet eine fortwährende Verdunstung statt, welche mit einer Abkühlung verbunden ist. Daher rührt es zum Theil, daß es der Mensch in dem heißesten Klima aushalten kann, ohne daß die Temperatur seines Blutes eine merkliche Veränderung erleidet, indem seine Ausdünstung stets der Temperatur proportional ist.

118. Die Wärme, welche bei der Dampfbildung gebunden und beim Uebergange des Dampfes in die tropfbare Form wieder frei wird, kann man einfach auf folgende Weise bestimmen. Man ver-

Digitized by Google

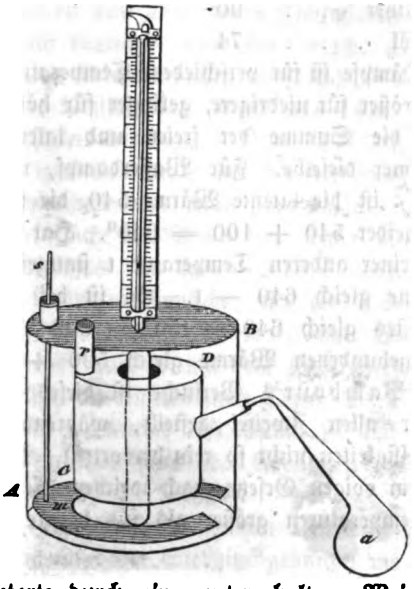
dampft eine gewogene Menge der Flüſſigkeit in einem Gefäße, welches durch eine Röhre mit einem anderen cylindriſchen Gefäße verbunden iſt, in dem ſich eine beſtimmte Menge kalten Waſſers befindet. Im letzteren Gefäße hat die Röhre eine ſpiralförmige Windung. Während nun die Dämpfe dieſe Röhre durchſtreichen, werden ſie verdichtet und geben ihre gebundene Wärme an das umgebende Waſſer ab, welches dadurch erwärmt wird. Es ſei nun in jenem Gefäße 1 Pfund Waſſer in Dampf verwandelt worden, während ſich im zweiten Gefäße b Pfund Waſſer von der Temperatur t befinden, welche durch den Dampf eine Temperatur von t' erlangt haben mögen, ſo daß alſo das Waſſer um t' — t = T° erwärmt worden iſt. Mithin hat der Dampf bei ſeiner Verdichtung ſo viel Wärme abgegeben, als nöthig iſt, um b Pfund Waſſer um T° oder um 1 Pfd. auf b. T° zu erwärmen. Da aber auch das Waſſer welches aus der Verdichtung des Dampfes hervorgeht, die Temperatur t' annimmt, ſo hat es von den 100 Graden, die es vor dem Uebergange in Dampf annehmen mußte, noch 100° — t'° verloren, weshalb die Wärmemenge, welche der Dampf allein an das Waſſer abgiebt, b. T° — (100 — t')° beträgt. Das Gefäß mit der ſpiralförmigen Röhre enthalte z. B. b = 17 Pfund Waſſer von t = 6° C., welches durch die aus dem erſten Gefäße kommenden Dämpfe auf 41° gebracht werden wird. Die Temperaturerhöhung der 17 Pfund Waſſer beträgt alſo 41° — 6° = 35°, diejenige von 1 Pfund alſo 595°. Der Dampf hat aber bei ſeiner Verdichtung zu Waſſer außer der eigentlichen latenten Wärme noch 100° — 41° = 59° an das Waſſer des Kühlgefäßes abgegeben, um ſich mit ihm auf gleiche Temperatur zu ſtellen. Die Wärme alſo, welche der Dampf als ſolcher an das Kühlwaſſer abgegeben hat, iſt gleich 595° — 59° = 534°. Hieraus folgt, daß dieſelbe Wärmemenge, welche nöthig iſt, um 1 Pfund Waſſer von 100° in Dampf von 100° zu verwandeln, hinreicht, um eine gleiche Waſſermenge von 0° auf 534° zu bringen.

Despretz erhielt für die latente Wärme nachſtehender Flüſſigkeiten die beigeſetzten Zahlenwerthe:

Waſſer	531
Alkohol	208
Schwefeläther . .	97
Terpentinöl . . .	77

Brix wandte, um die latente Wärme der Dämpfe zu ermitteln, folgenden Apparat an. Die in der Retorte a entwickelten Dämpfe werden in dem cylindriſchen Gefäße CD verdichtet, wo ſie ihre Wärme

Digitized by Google



dem Wasser im Gefäße AB mittheilen. Die im Cylinder CD enthaltene Luft wird von den Dämpfen durch das Rohr r getrieben. In der Mitte des Apparates sieht man ein Thermometer, vermittelst dessen die Temperatur des Kühlwassers beobachtet wird. Um die Wärme im letzteren möglichst gleichförmig zu vertheilen, bewegt man eine Metallscheibe m an dem Stabe s auf und ab, wodurch das Kühlwasser in steter Bewegung erhalten werden kann. Während die Flüssigkeit in der Retorte durch eine untergehaltene Weingeistflamme in's Kochen gebracht wird, beseitigt man den Wärmezufluß zum Apparate von dieser Seite her durch einen Schirm von Pappe oder Holz. In das Gefäß AB bringt man eine gewogene Menge Wasser; anstatt aber, wie im obigen Versuche, auch die in der Retorte befindliche Flüssigkeit zu wägen, bestimmt man den Gewichtsverlust, den die Flüssigkeit in der Retorte während des Versuches erleidet. Die Wärmemenge, welche bei der Verdichtung der Dämpfe frei wird, läßt sich aus diesen beiden Bestimmungen leicht berechnen. Auch gebrauchte Brix die Vorsichtsmaßregel, daß er das in das Kühlgefäß zu bringende Wasser vorher um einige Grade unter die Temperatur der umgebenden Luft erkalten ließ und daß er die Dampfbildung nur so lange unterhielt, bis die Temperatur des Kühlwassers die Lufttemperatur um eben so viel übertraf, als sie beim Beginn des Versuches unter derselben gewesen war. Man kann dann füglich annehmen, daß der Apparat während der ersten Hälfte des Versuches ebenso viel Wärme von der Umgebung empfing als er in der zweiten Hälfte wieder verlor.

Brix fand auf diese Weise für die latente Wärme der Dämpfe folgender Flüssigkeiten die beistehenden Werthe:

Wasser	540
Alkohol	214

Digitized by Google

Schwefeläther . .	90
Terpentinöl . . .	74

Die latente Wärme der Dämpfe ist für verschiedene Temperaturen derselben ungleich und zwar größer für niedrigere, geringer für höhere Temperaturen. Dagegen ist die Summe der freien und latenten Wärme beim Wasserdampf immer dieselbe. Für Wasserdampf, welcher sich bei 100° gebildet hat, ist die latente Wärme 540, die freie aber 100°, also die Summe beider 540 + 100 — 640°. Hat nun die Dampfbildung bei irgend einer anderen Temperatur t stattgefunden, so ist die latente Wärme gleich 640 — t. So ist bei 50° die latente Wärme des Dunstes gleich 640 — 50 — 590, also die Summe der freien und gebundenen Wärme gleich 590 + 50 — 640, u. s. w. Durch Pambour's Versuche ist dieses Gesetz beim Wasserdampf außer allen Zweifel gestellt, während es bei den Dämpfen anderer Flüssigkeiten nicht so rein hervortritt. Man sieht übrigens, daß es mit dem obigen Gesetze, nach welchem die latente Wärme für niedrige Temperaturen größer als für höhere ist, vollkommen übereinstimmt.

Drittes Kapitel.

Von der Anwendung des Dampfes.

119. Im vorigen §. sahen wir, daß Dämpfe, welche durch ein mit kaltem Wasser umgebenes Rohr gehen, wieder zu Wasser verdichtet werden. Hierauf beruht der Destillationsproceß, welcher insgemein angewendet wird, um aus einem Gemenge flüchtiger und nichtflüchtiger Substanzen erstere von letzteren zu trennen. Setzt man nämlich das Gemenge einer Temperatur aus, bei welcher die flüchtigen Substanzen dampfförmig werden, so müssen sich diese von den nichtflüchtigen trennen und können nun durch Abkühlung auf die erwähnte Weise tropfbar gemacht werden. Die Verwandlung in Dampfform geschieht entweder in Retorten oder bei Destillationsprocessen im Großen in Kesseln oder sogenannten Blasen, wie bei der Destillation des Weingeistes aus der Maische. Die Tropfbarmachung der dampfförmigen Flüssigkeit wird dann entweder in einer kleinen Vorlage, die man fortwährend mit kaltem Wasser betröpfelt, oder in einem schlangenförmigen Rohre bewirkt, welches durch ein Gefäß mit kaltem Wasser führt. Wenn das Gemenge mehrere Flüssigkeiten von verschiedener Flüchtigkeit enthält, so entstehen aus allen diesen meist gleichzeitig Dämpfe, so daß auch das Product der De-

Digitized by Google

ſtillation aus allen dieſen Flüſſigkeiten zuſammengeſetzt iſt, wobei natürlich diejenige Flüſſigkeit, welche am flüchtigſten iſt, und alſo die meiſten Dämpfe liefert, vorherrſcht. Durch mehrere auf einander folgende Deſtillationen kann man dann eine Concentration der letzteren Flüſſigkeit bewirken. Beim Deſtillationsproceſſe kommt es auf ein richtiges Verhältniß zwiſchen der Fläche der Blaſe und derjenigen des Kühlrohres an. Man muß dafür Sorge tragen, daß die größtmögliche Fläche der Blaſe dem Feuer und die größtmögliche Fläche des Kühlrohres dem kalten Waſſer ausgeſetzt iſt. Bei der Deſtillation der Branntweinmaiſche, wo die Dämpfe mit einer Temperatur von 80° in das Kühlrohr treten und die mittlere Wärme des Kühlwaſſers da, wo es mit dem Kühlrohre in Berührung ſteht, etwa 51° beträgt, condenſiren nach Otto 20 Quadratfuß Fläche der Kühlröhren in 1 Minute 1½ Pfund Flüſſigkeit, während auf 1 Quadratfuß der Kühlröhren bei Apparaten mit Vorwärmern 2—3 Quadratfuß Feuerfläche kommen.

Bei den gewöhnlichen Deſtillationen wird die Flüſſigkeit auf die Temperatur der Siedhitze gebracht, um ſie in Dampf zu verwandeln. Man kann aber auch im leeren Raume deſtilliren, d. h. man kann die Dampfbildung durch Verdünnung der Luft über der Flüſſigkeit beſchleunigen. Brennſtoff wird dabei nicht erſpart, da dieſelbe Dunſtmenge zu ihrer Bildung immer dieſelbe Wärmemenge nöthig hat. Die Deſtillation im leeren Raume iſt aber da vorzuziehen, wo der zu deſtillirende Stoff nicht ſtark erhitzt werden darf.

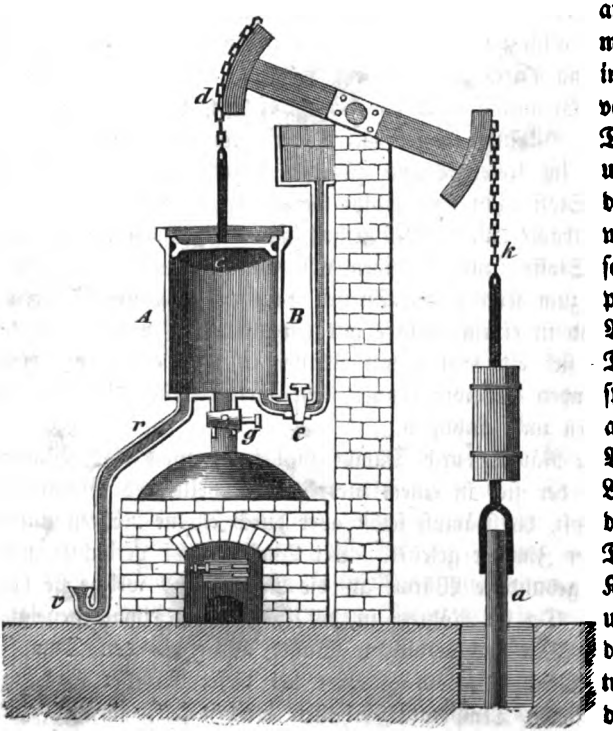
Der Waſſerdampf wird mit Vortheil zum Abdampfen und Trocknen gefärbter Stoffe, zum Erhitzen von Glättwalzen u. ſ. w. gebraucht. Auch zum Kochen der Speiſen kann er verwendet werden. Die Speiſen ſind in einem Gefäße mit durchlöchertem Boden enthalten, unter dem ſich ein Gefäß mit Waſſer befindet. Die aus dem letzteren entſtehenden Dämpfe können auf dieſe Weiſe die Speiſen ganz durchdringen und einhüllen.

Um größere Räume durch Dampf zu heizen, wird das Waſſer in einem Keſſel, der ſich in einem niedrigeren Theile des Gebäudes befindet, verdampft, die Dämpfe ſelbſt aber durch eiſerne Röhren unter die Fußboden der Zimmer geleitet. Der Waſſerdampf verdichtet ſich und giebt ſeine gebundene Wärme an die Röhren ab, welche ſie der Luft mittheilen. Da die Röhren in der Regel eine etwas geneigte Lage haben, ſo fließt das verdichtete Waſſer wieder in den Dampfkeſſel zurück. Wenn nun ein Zimmer bei dieſer Art der Heizung auf einer beſtimmten Temperatur erhalten werden ſoll, ſo muß die

Digitized by Google

Größe des Dampfkeſſels in einem gewiſſen Verhältniſſe zur Oberfläche der Dampfröhren ſtehen, damit der Luft die abgegebene Wärme in jedem Augenblicke wieder erſetzt wird. Da man hier nur ein Feuer zu unterhalten braucht, ſo iſt die Dampfheizung jedenfalls bequemer als die durch Oefen bewirkte, Erſparniß an Brennſtoff tritt aber nur in ſofern ein, als ſie im Großen angewendet wird, weil dann dem Feuerheerde eine vortheilhaftere Conſtruction als den gewöhnlichen Oefen gegeben werden kann. Man trifft die Einrichtung ſo, daß das Feuer um dem Dampfkeſſel circulirt.

120. Einen großartigen Umſchwung in dem Gewerbs- und Verkehrsleben hat aber der Dampf durch ſeine Elaſticität bewirkt, die ihn zu einer der mächtigſten bewegenden Kräfte macht. Die erſte bedeutende Anwendung, welche man von der bewegenden Kraft des Dampfes machte, beſtand in dem Emporheben von Waſſer vermittelſt der ſogenannten atmoſphäriſchen Maſchine. Dieſelbe wurde von Savary erfunden und durch Newcomen verbeſſert. Der Kolben der Pumpe a ſteht mit dem einen Ende eines Wagebalkens in Verbindung, deſſen anderes Ende mit dem Kolben im Cylinder AB verbunden iſt. Durch den Auf- u. Niedergang des Kolbens wird das Waſſer in der Pumpe auf bekannte Weiſe gehoben. Dieſes Kolbenſpiel wird aber auf folgende Weiſe bewirkt. Läßt man durch den Hahn g Dampf aus d. Keſſel in den unteren Theil des Cylinders treten, ſo wird der Kolben ge-



Digitized by Google

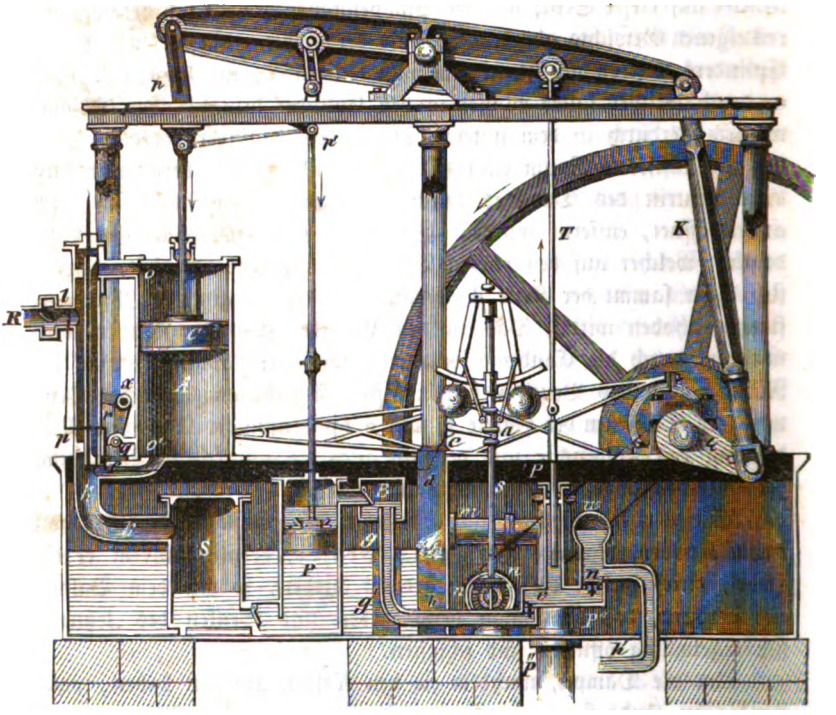
hoben, durch das größere Gewicht der Kette k ſenkt ſich der Balancier auf dieſer Seite, und die Pumpenſtange bewegt ſich vermöge ihres eigenen Gewichts abwärts. Sobald der Kolben c am oberen Ende des Cylinders angekommen iſt, ſchließt man den Hahn g und öffnet den Hahn e, durch welchen kaltes Waſſer in den Cylinder dringt. Die Dämpfe werden hierdurch in dem unteren Theile des Cylinders verdichtet, ſo daß ein luftleerer Raum entſteht, da die früher darin befindliche Luft beim Eintritt des Dampfes durch ein Ventil v, welches ſich nach außen öffnet, entfernt wurde. In Folge des atmoſphäriſchen Luftdruckes, welcher auf den oberen Theil des Kolbens c wirkt, bewegt ſich dieſer ſammt der Kette d abwärts, wodurch dann die Pumpenſtange gehoben wird. Das in den Cylinder geſpritzte Waſſer wird mit dem durch die Condenſation der Dämpfe entſtandenen durch die Röhre r und das Ventil v fortgeſchafft. Durch abwechſelndes Oeffnen und Schließen der Hähne g und e kann nun der Auf- und Niedergang des Kolbens c und deshalb auch die entſprechende Bewegung der Pumpenſtange beliebig unterhalten werden.

Dieſes läſtige Oeffnen und Schließen der Hähne wurde zuerſt von einem Knaben, Namens Humphry Potter, beſeitigt, indem er die Hebel, durch welche die Hähne gedreht werden, ſo mit dem Balancier verband, daß die Hähne beim Heben und Senken des letzteren ſich regelmäßig öffneten und ſchloſſen.

Um die Dämpfe, nachdem ſie den Kolben gehoben haben, vollſtändig zu condenſiren, muß eine ziemlich bedeutende Menge kalten Waſſers in den Cylinder geſpritzt werden. Hierdurch werden aber die Cylinderwände erkaltet und daher auch die neu eintretenden Dämpfe, ſobald ſie mit den kalten Wänden in Berührung kommen, zum Theil verdichtet, indem ſie einen Theil ihrer Wärme an jene abgeben. Deshalb giebt dieſe Maſchine im Verhältniß zum verwendeten Brennſtoff nur einen geringen Nutzeffect. Dieſem Uebelſtande wurde von Watt dadurch abgeholfen, daß er die Verdichtung der Dämpfe in einem beſonderen Gefäße, dem ſogenanten Condenſator, ſtattfinden ließ. Auch die Mitwirkung des Luftdruckes machte er entbehrlich, indem er dem Dampf abwechſelnd in den oberen und unteren Theil des Cylinders den Zutritt geſtattete. Nach dieſen und anderen Verbeſſerungen entſtand endlich die vollſtändige Watt'ſche Dampfmaſchine, von der nachſtehende Figur eine Darſtellung giebt.

Der Cylinder A iſt oben und unten luftdicht geſchloſſen, damit der äußere Luftdruck ganz außer Spiel bleibt. Die Dämpfe gelangen aus dem Keſſel in das Rohr R und von da abwechſelnd bei o

Digitized by Google



und o′ in den Cylinder. Bei der in der Figur angegebenen Stellung tritt der Dampf bei o in den oberen Theil des Cylinders, während die unterhalb des Kolbens befindlichen Dämpfe bei o′ durch den Kanal k, k . . . in den Condensatorss treten, wo sie durch eingespritztes Waſſer verdichtet werden. Im unteren Theile des Cylinders entſteht ſomit ein luftverdünnter Raum und der Kolben wird durch den Druck des Dampfes abwärts bewegt. Der Condenſator ſteht in einem mit kaltem Waſſer gefüllten Behälter, aus dem daſſelbe durch eine Oeffnung in den erſteren einſtrömt. Durch eine Pumpe P wird das Waſſer wieder aus dem Condenſator entfernt. Mit den Waſſerdämpfen gelangt gleichzeitig Luft aus dem Keſſel in den Cylinder und von dieſem in den Condenſator. Während nun die Dämpfe in dem letzteren verdichtet werden, behält die Luft ihren gasförmigen Zuſtand bei, ſo daß ſie allmälig im Vereine mit derjenigen Luft, welche mit dem kalten Waſſer in den Condenſator kommt, einen leeren Raum auf der einen Seite des Kolbens unmöglich machen würde. Auch

Digitized by Google

diese Luft wird durch die Pumpe P fortgeschafft. Das in dem Condensator entstandene warme Wasser gelangt nun durch die Pumpe P in den Behälter B, wo es theils durch die Röhre gg' abfließt, theils durch die Röhre h in die Pumpe P' gelangt, von der es in den Windkessel w gepreßt wird. Von hier aus geht es durch die Röhre h' in den Dampfkessel, zu dessen Speisung dasselbe, eben weil es warm ist, mit Vortheil verwendet werden kann. Man nennt P' die Speisepumpe und h' die Speiseröhre. Das kalte Wasser, welches den Condensator umgiebt, wird durch die sogenannte Kaltwasserpumpe P'', welche sich auf der anderen Seite des Balancier der Speisepumpe gerade gegenüber befindet, gehoben und durch die Röhre m in den entsprechenden Behälter gebracht.

Die erwähnten Pumpen werden durch die Maschine selbst in Bewegung gesetzt, indem die Pumpenstangen, wie die Figur zeigt, mit dem Balancier in Verbindung stehen. Wenn z. B. der Balancier auf der rechten Seite in die Höhe geht, wird die Stange T und in Folge dessen auch der Kolben der Speiseröhre gehoben, wobei sich das Ventil v öffnet. Gehen aber der Balancier und der erwähnte Kolben niederwärts, so schließt sich v, während das Ventil n gehoben wird.

Die Bewegung des Kolbens C theilt sich vermittelst des Balancier der Kurbelstange Q mit, durch welche sie in eine kreisförmige Bewegung verwandelt wird. Die Kolbenstange bewegt sich dampfdicht durch eine Stopfbüchse und wird sammt der Kolbenstange der Luftpumpe durch ein System beweglicher Stangen pp', das man Parallelogramm nennt, während der Bewegung in einer lothrechten Stellung erhalten. Ohne diesen Mechanismus würde die Stange durch den Balancier abwechselnd nach Rechts und Links gedrückt und dadurch der luftdichte Verschluß der Stopfbüchse aufgehoben werden.

Die Bewegung des Kolbens C ist nicht gleichförmig, sie hat die größte Geschwindigkeit in dem Moment, wo der Kolben die Mitte des Cylinders passirt, sie wird immer geringer, während sich der Kolben dem oberen oder unteren Ende des Cylinders nähert. Der Druck nun, welchen die Stange K auf die Kurbel ausübt, läßt sich in zwei zu einander senkrechte Kräfte zerlegen, von denen die eine in der Richtung der Kurbel selbst als Druck auf die Are wirkt und nichts zur Umdrehung beiträgt, während die andere in der Richtung der Tangente der Kurbelbahn wirkt und eigentlich die Umdrehung hervor-

Digitized by Google

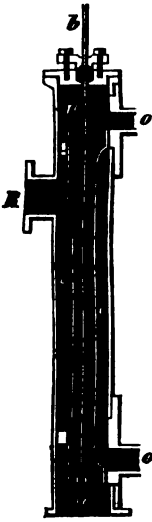
bringt. Wenn der Kolben gerade die Mitte des Cylinders einnimmt, hat der Kurbelarm eine verticale Richtung. In diesem Moment wirkt der Druck, welcher vom Kolben ausgeht, nur als Druck auf die Axe, die Maschine geht nur weiter in Folge der einmal erlangten Bewegung. Sobald aber die Kurbel die verticale Richtung verlassen hat, wächst fortwährend der tangentiale Antheil der vom Kolben ausgehenden Kraft, so daß er am größten wird, wenn der Kurbelarm eine wagerechte Stellung hat. Nun erhält die Kurbel während einer vollen Umdrehung zweimal eine verticale und zweimal eine horizontale Stellung und somit erreicht auch die bewegende Kraft während derselben Umdrehung zwei Maxima und zwei Minima. Die Bewegung muß daher eine abwechselnd beschleunigte und verzögerte sein. Durch das Schwungrad wird aber die Maschine in einem gleichförmigen Gange erhalten, indem es die Differenz zwischen der größten und kleinsten Geschwindigkeit möglichst ausgleicht und zwar um so mehr, je größer seine Masse ist. Eine Vermehrung der bewegenden Kraft hat dann keine merkliche Vermehrung der Geschwindigkeit zur Folge, weil die träge, zu bewegende Masse sehr bedeutend ist. Eben so wenig kann die Verminderung der bewegenden Kraft eine merkliche Abnahme der Geschwindigkeit hervorbringen, weil die Masse eine bedeutende Bewegungsquantität besitzt.

Wenn der Widerstand, welcher durch die Maschine zu überwinden ist, abnimmt, so muß natürlich auch ihr Gang schneller werden, sofern der Dampf unvermindert zuströmt. Um den Gang der Maschine in dieser Hinsicht zu reguliren, um also zu verhüten, daß die Geschwindigkeit über eine gewisse Grenze wächst, dient eine besondere Vorrichtung, welche Regulator genannt wird. Um die Axe des Schwungrades ist nämlich eine Schnur geschlungen, welche zugleich über die Rolle n geht. An der Axe der letzteren befindet sich ein verticales conisches Rädchen, dessen Zähne in ein ähnliches, aber horizontalliegendes eingreifen, wodurch sich dieses um eine verticale Axe drehen muß. Mit dem letzteren dreht sich zugleich die Stange s um, welche oben ein conisches Pendel trägt. Die Stangen, an denen die Kugeln herabhängen, sind durch Stäbe mit einer Hülse verbunden, welche den Stab s umschließt. Bei der Drehung dieses Stabes fahren die Kugeln vermöge ihrer Centrifugalkraft auseinander, die Hülse wird gehoben und dadurch der Winkelhebel acd um c gedreht. Gleichzeitig muß sich die Stange df nach der Rechten hin bewegen, wodurch der Winkelhebel frp um r gedreht und die Stange pl niedergezogen wird. Der Punkt l ist endlich durch einen Hebel-

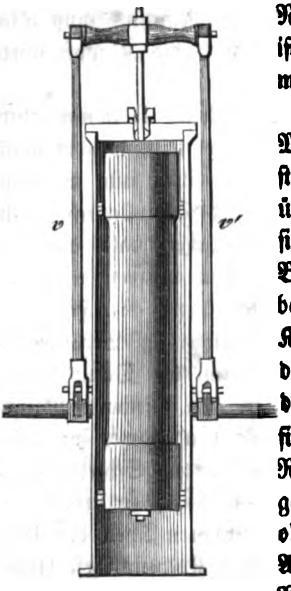
Digitized by Google

arm mit einer Klappe verbunden, welche beim Niederziehen des Punktes l das Dampfzuflußrohr R verschließt. Die Maschine muß a so langsamer gehen, die Kugeln fallen zusammen und die Klappe wird wieder geöffnet, u. s. w.

Um zu machen, daß der Dampf aus dem Rohre R abwechselnd n den oberen und unteren Theil des Cylinders tritt, wendet man ein sogenanntes Schieberventil an. Das Behälter, aus welchem der Dampf durch o und o′ nach dem Cylinder geht, ist nämlich durch eine Art Schiebkasten in zwei Räume abgesondert, dergestalt, daß der mittlere Raum c von dem oberen u und von dem unteren u′ vollständig getrennt ist, während die beiden letzteren durch die Höhlung des Schiebkastens selbst mit einander in Verbindung stehen. Aus dem Kessel strömt nun der Dampf fortwährend durch das Rohr R in den mittleren Raum des Behälters, wobei die Räume u, u′ immer mit dem Condensator communiciren. Wenn das Schieberventil die Stellung hat, wie die Figur zeigt, so strömt der Dampf aus c durch o′ in den unteren Theil des Cylinders, während der oberhalb des Kolbens befindliche Dampf durch o in den Condensator tritt. Wird aber die Stange b gehoben, so strömt umgekehrt der Dampf aus c durch o in den oberen Theil des Cylinders, und der unter dem Kolben befindliche Dampf durch o′ in den Condensator. Die Bewegung des Schieberventils geschieht durch die Maschine selbst auf folgende Weise. An der Axe des Schwungrades (s. die Hauptfigur) ist eine excentrische Scheibe befestigt, d. h. eine solche, deren Mittelpunkt nicht in dieser Axe liegt. Während die Axe eine Umdrehung macht, beschreibt der Mittelpunkt der excentrischen Scheibe einen Kreis. Um diese Scheibe ist ein Ring gelegt, der mit einem Gestänge verbunden ist, dessen Ende bei q in einen Hebelarm eingreift. Der letztere ist um die Axe x, welche durch die ganze Breite der Maschine geht, drehbar. An dieser Axe ist auf jeder Seite des Dampfbehälters ein Hebelarm befestigt, welcher mit einer verticalen Stange in Verbindung steht. Jene Figur zeigt nur einen dieser Hebelarme, die nachstehende beide verkürzt. Die verticalen Stangen sind oben durch einen Querstab mit einander verbunden, von dessen Mitte eine Stange herabgeht, welche am Schieberventil befestigt ist. Durch den erwähnten Hebelarm und durch die Stangen v und v′ wird der Querstab abwechselnd gehoben



Digitized by Google



und gesenkt, womit dann auch der Auf- und Niedergang des Schieberventils verbunden ist. Diese ganze Vorrichtung führt den Namen der Steuerung. —

Auf ähnliche Art, wie die Watt'sche Maschine, ist die Schiffsdampfmaschine construirt, bei der nur das Schwungrad als überflüssig weggelassen ist. Dagegen befindet sich auf jeder Seite dieser Maschine ein Balancier, welcher aber unterhalb der Kurbelaxe angebracht ist. Die Bewegung des Kolbens überträgt sich hier auf die Axe der Schaufelräder, welche sich in einer bedeutenden Höhe über dem Wasserspiegel befindet, so daß nur der untere Theil dieser Räder in's Wasser eingetaucht ist. Uebrigens hat man auch Schiffsdampfmaschinen ohne Balancier construirt, bei denen die Axe des Dampfcylinders einen bestimmten Winkel mit der Horizontalen macht, dergestalt, daß die Verlängerung dieser Axe die Umdrehungsaxe der Schaufelräder trifft. Die Kurbel ist durch eine Treibstange unmittelbar mit der Kolbenstange verbunden.

121. Läßt man den Dampf bald über bald unter den Kolben treten, ohne ihn zu condensiren, so muß er eine Spannung haben, welche wenigstens 2 bis 2½ Mal größer als der Druck der Atmosphäre ist, falls noch eine bedeutende Wirkung stattfinden soll. Der Luftdruck, welcher auf der einen Seite des Kolbens wirkt, muß nämlich dann von der Spannkraft des Dampfes noch überwunden werden. Wenn z. B. der einströmende Dampf eine Spannkraft von 2 Atmosphären hat, so geht 1 Atmosphäre zur Ueberwindung des Luftwiderstandes verloren, bei einer Spannkraft von 3 Atmosphären würde ½ derselben zu diesem Behufe in Anspruch genommen werden und daher als bewegende Kraft verschwinden. Man sieht hiernach aber auch, daß von der gesammten Dampfkraft um so weniger zur Ueberwindung des Luftwiderstandes verloren geht und daß deshalb der Nachtheil, welcher aus der Weglassung des Condensators hervorgeht, um so geringer ausfällt, je größer die Spannkraft des Dampfes ist. Hat man es daher mit stark gespannten Dämpfen zu thun, so kann man den Condensator nebst der Luftpumpe ganz weglassen.

Digitized by Google

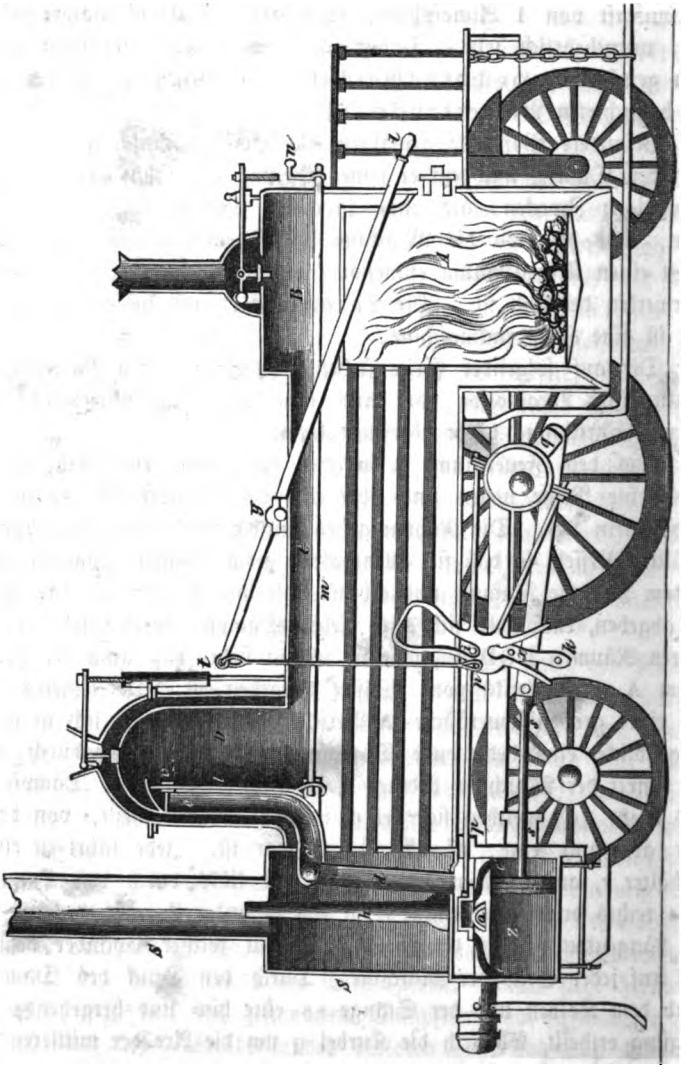
Dabei hat man noch den Vortheil, daß derjenige Antheil der Dampfkraft, welcher zur Bewegung der Luftpumpe nöthig ist, als Arbeitskraft verwendet werden kann. Hätte der Dampf aber nur eine Spannkraft von 1 Atmosphäre, so würde der Condensator freilich ganz unentbehrlich sein. Dampfmaschinen ohne Condensator nennt man gewöhnlich Hochdruckmaschinen im Gegensatze zu der vorher betrachteten Niederdruckmaschine.

Besondere Vortheile gewähren die Hochdruckmaschinen da, wo man den Dampf, nachdem er seine Wirkung geübt hat, noch zu anderweitigen Zwecken, als zum Trocknen, Heizen u. dgl. benutzen kann, oder da, wo die Maschine bei Erzeugung einer bedeutenden Kraft einen kleinen Raum einnehmen muß, wie dies bei den Dampffuhrwerken der Fall ist. Die Locomotive auf unseren Eisenbahnen ist eine Hochdruckmaschine.

Die auf folgender Seite stehende Figur stellt den Längendurchschnitt einer Locomotive dar, aus dem man das Wesentliche der ganzen Einrichtung leicht übersehen kann.

Aus dem Feuerraume A streichen die Flamme und erhitzte Luft durch eine Reihe neben und über einander liegender Röhren in den Schornstein SS. Die Röhren gehen mitten durch einen mit Wasser gefüllten Kessel, so daß sie allenthalben vom Wasser umgeben sind. Indem nun die Flamme und erhitzte Luft ihre Wärme an das Wasser abgeben, entwickeln sich aus diesem Dämpfe, welche sich in den oberen Räumen BCD ansammeln. Man sieht, daß auch der Feuerraum A großentheils vom Wasser umgeben ist. Da letzteres also mit einer großen Feuerfläche in Berührung ist, so muß sich in jedem Augenblicke eine bedeutende Dampfmenge entwickeln, wodurch eben der Effect der Maschine bedingt ist. Aus D gehen die Dämpfe in das Rohr cc', welches sich bei c' in zwei Röhren theilt, von denen hier aber nur eine, nämlich d, sichtbar ist. Jede führt zu einem Behälter r, aus welchem der Dampf bald links durch den Kanal e, bald rechts durch den Kanal e' in den Cylinder Z tritt, welcher hier im Längendurchschnitt dargestellt ist. Ein solcher Cylinder befindet sich auf jeder Seite der Maschine. Durch den Druck des Dampfes wird dem Kolben und der Stange ss eine hin- und hergehende Bewegung ertheilt, wodurch die Kurbel q um die Are der mittleren Räder gedreht wird. Auf der unteren Grenzfläche des Behälters r bewegt sich ein Schieber hin und her, dessen mittlerer Theil einen nach unten offenen Kasten bildet. Durch diesen Schieber werden die Kanäle e, e' abwechselnd geöffnet und geschlossen. In unserer Figur

Digitized by Google



Digitized by Google

ist der Kanal links offen, der Dampf strömt auf der linken Seite des Cylinders ein und treibt den Kolben und die Stange s nach der Rechten. Deshalb geht auch die Kurbel q nach der rechten Seite hin, so daß sich das mittlere Rad von der Rechten gegen die Linke drehen muß. An der Axe des mittleren Rades ist eine excentrische Scheibe befestigt, welche durch einen Ring mit einem Gestänge und einer Doppelgabel verbunden ist, welche letztere in den oberen Zapfen i eines Hebels ik eingreift, dessen Drehpunkt x ist. Mit der Kurbel q dreht sich zugleich die excentrische Scheibe um, wodurch dann das Gestänge und vermittelst der Stange pp, welche an dem Hebel ik befestigt ist, auch das Schieberventil fortgeschoben wird. Auf diese Weise wird der Kanal e' allmälig geöffnet und mit dem Dampfbehälter r in Verbindung gebracht, dagegen wird der Kanal e von diesem Raume abgesperrt und mit der Höhlung o in Gemeinschaft gesetzt. Im vorigen Falle strömte der Dampf durch den Kanal e in den Cylinder, während der Dampf auf der anderen Seite des Kolbens durch den Kanal e' nach o und von da in das Rohr h entwich; jetzt strömt er aus r durch e' auf der rechten Seite in den Cylinder ein, während der Dampf auf der anderen Seite des Kolbens durch e nach o u. s. w. gelangt. Inzwischen ist die Kurbel q über die horizontale Stellung, welche sie rechts von der Axe einnahm, hinausgegangen und das Rad bewegt sich in seiner früheren Richtung, nämlich von der Rechten gegen die Linke weiter. Um nach Belieben vorwärts und rückwärts fahren zu können, dient die Doppelgabel. Wollte man z. B. bei der gegenwärtigen Stellung des Kolbens die Bewegung umkehren oder rückwärts fahren, so brauchte man nur den Hebel tt', welcher seinen Drehpunkt in y hat, hinten in die Höhe zu heben, wodurch der Scheitel der unteren Gabel auf den Zapfen k herabgedrückt und dieser etwas nach Rechts gedreht wird. Dabei muß sich das obere Ende des Hebels ik und damit auch die Stange pp sammt dem Schieber nach Links bewegen. Dadurch wird der Kanal e' so weit geöffnet, daß der Dampf durch ihn auf der rechten Seite des Kolbens eintritt, ehe noch die Kurbel die horizontale Lage angenommen hat. Der Kolben und mit ihm die Kurbel bewegen sich von der Rechten gegen die Linke, also in einer Richtung, welche der vorigen entgegengesetzt ist. So lange nun die Gabel mit dem unteren Zapfen des Hebels ik in Verbindung bleibt, ist mit jeder Drehung der excentrischen Scheibe eine entgegengesetzte Bewegung der Schiebstange pp verbunden, d. h. sie bewegt sich nach Links, wenn der Zapfen k nach Rechts geht, und umgekehrt, wenn

Digitized by Google

dieſer ſich nach Links hin bewegt, geht ſie nach der rechten Seite hin.

Dieſer Mechanismus hat in neuerer Zeit einige Veränderungen erfahren, doch iſt das Princip, wenigſtens im Weſentlichen, daſſelbe geblieben.

Durch jeden Hin- und Hergang des Kolbens wird eine volle Umdrehung der mittleren Räder bewirkt, ſo daß dadurch der Wagen um eine Strecke weiter kommt, welche dem Umfange der mittleren Räder gleich iſt. Die Geſchwindigkeit der Bewegung hängt von der Dampfmenge ab, welche in jedem Augenblick in den Cylinder tritt. Um die Maſchine in dieſer Hinſicht zu reguliren, iſt bei v eine Scheibe angebracht, welche vermittelſt der beiden Stangen l, m und der Kurbel n vom Standpunkte des Locomotivführers aus gedreht werden kann. Hierdurch hat man es in ſeiner Gewalt, bald mehr bald weniger Dampf einſtrömen zu laſſen.

Locomotive von vorzüglicher Güte liefert gegenwärtig die Maſchinenfabrik von Henſchel in Caſſel.

Was den Kohlenverbrauch anbetrifft, ſo iſt dieſer bei einer Locomotive viel größer als bei einer feſtſtehenden Dampfmaſchine von gleicher Wirkung, weil erſtere einen viel kleineren Keſſel hat.

122. Die Wirkung einer Dampfmaſchine läßt ſich berechnen, wenn man die Spannkraft des Dampfes im Cylinder und Condenſator und die Fläche des Kolbens kennt, auf welchen der Dampf ſeinen Druck ausübt. Die eben erwähnten Spannkräfte ergeben ſich aus einer Tabelle für die Spannkraft des Waſſerdampfes, ſobald nur die Temperatur des Waſſers im Keſſel und Condenſator bekannt iſt. Den Druck des Dampfes im Keſſel kann man übrigens leicht aus dem Gewichte erfahren, welches das Ventil zu tragen vermag, wenn es mit der Elaſticität des Dampfes gerade im Gleichgewicht ſteht. Hat das Ventil z. B. 1 Quadratzoll Querſchnitt und eine Belaſtung von a Pfund, ſo iſt der Druck des Dampfes gleich a + 15 — a′ Pfund, wenn man ſich erinnert, daß der Druck der Luft auf den Quadratzoll 15 Pfd. beträgt. Der Kolben im Cylinder erleidet nun von dem ſo geſpannten Dampfe einen Druck, welcher ſich durch den Druck einer Queckſilberſäule ausdrücken läßt, deren Baſis gleich der Kolbenfläche iſt und deren Höhe dem Unterſchiede der Spannkraft des Dampfes im Keſſel und im Condenſator entſpricht. Iſt demnach die Spannkraft des noch im Condenſator vorhandenen Dampfes, auf den Druck der Atmoſphäre reducirt, gleich b Pfund, ſo iſt der Druck auf den Kolben a′ — b. Dieſer Druck kann nun nicht als reine Arbeitskraft betrachtet werden, weil ein

Digitized by Google

Theil deſſelben zur Ueberwindung der Reibungswiderſtände und zur Bewegung der Hilfspumpen und Steuerung verwendet wird. Dieſer Theil muß alſo noch von jenem Drucke abgezogen werden. Bezeichnet man nun den Reſt, welcher als eigentliche Arbeitskraft anzuſehen iſt, durch r, ſo hat man, falls die Fläche des Kolbens gleich c Quadratzoll iſt, für den Geſammtdruck auf den Kolben c. r = d Pfund. Wenn ferner die Länge eines Kolbenhubes gleich l Decimeter und die Anzahl der Gänge des Kolbens in 1 Secunde gleich n iſt, ſo legt der Kolben in dieſer Zeit offenbar n. l = p Decimeter zurück. Der Kolben kann alſo d Pfund in 1 Secunde p Decimeter hoch oder in derſelben Zeit d. p = P Pfund 1 Decimeter hoch heben. Gewöhnlich wird der Effect einer Dampfmaſchine nach Pferdekräften angegeben, indem man unter einer Pferdekraft auf Grund der Erfahrung eine ſolche verſteht, welche 1500 Pfund in 1 Secunde 1 Decimeter hoch zu heben vermag. Um alſo den Effect der Maſchine durch Pferdekräfte auszudrücken, hat man jene P Pfd. durch 1500 zu dividiren.

Bei einer Hochdruckmaſchine iſt an die Stelle des Gegendruckes des noch unverdichteten Dampfes im Condenſator der Druck der Atmoſphäre zu ſetzen.

Beſondere Vortheile kann man den Hochdruckmaſchinen dadurch abgewinnen, daß man den Dampf durch Expanſion wirken läßt, welches geſchieht, wenn man ihn in dem Augenblicke vom Cylinder abſperrt, wo der Kolben erſt die Hälfte oder zwei Drittheile ſeines Weges zurückgelegt hat, wo er dann durch die Expanſivkraft des Dampfes bis an's Ende bewegt wird. Nehmen wir an, es ſtröme, wie gewöhnlich, während des ganzen Kolbenhubes, Dampf von a Atmoſphären Spannkraft in den Cylinder, ſo iſt am Ende des Kolbenhubes der ganze Cylinder mit Dampf von a Atmoſphären angefüllt. Wäre aber in denſelben Cylinder Dampf von doppelt ſo großer Spannkraft, alſo von 2 a Atmoſphären, eingetreten, ſo würde auch der Druck auf den Kolben doppelt ſo groß geweſen ſein und der mechaniſche Effect, welchen im vorigen Falle ein ganzer Kolbenhub hervorbrachte, müßte ſchon bewirkt ſein, wenn der Kolben erſt in der Mitte des Cylinders angekommen iſt. Sperrt man nun in dieſem Augenblicke den ferneren Zufluß des Dampfes vom Cylinder ab, ſo muß der Kolben die übrige Hälfte ſeines Weges blos vermöge der Spannkraft des ſchon im Cylinder vorhandenen Dampfes zurücklegen. Dabei nimmt die Spannkraft des Dampfes allmälig ab, ſo daß ſie in dem Moment, wo der Kolben das Ende ſeiner Bahn erreicht hat, noch a Atmoſphären beträgt. Der Effect nun, welchen der Dampf

Digitized by Google

während der zweiten Hälfte des Kolbenhubes hervorbringt, kann als Gewinn betrachtet werden. Die Absperrung des Dampfes geschieht durch einen besonderen Expansionsschieber, welcher vermittelst einer excentrischen Scheibe auf ähnliche Weise wie das früher betrachtete Schieberventil in Bewegung gesetzt wird.

Viertes Kapitel.

Von der Wärmecapacität.

123. Wiewohl sich der absolute Wärmegehalt eines Körpers nicht bestimmen läßt, so kann man dennoch die Wärmemengen verschiedener Körper mit einander vergleichen und durch Zahlen ausdrücken. Auch versteht es sich von selbst, daß die Wärmemenge eines Körpers unter sonst gleichen Umständen der Masse proportional sein muß, d. h. daß ein Körper von doppelter Masse eine zweifache, von dreifacher Masse eine dreifache Wärmemenge haben muß, u. s. w. Ein Körper kann eine größere oder geringere Wärmemenge als ein anderer nöthig haben, damit seine Temperatur um 1° erhöht werde. In diesem Sinne spricht man von verschiedenen Wärmecapacitäten; die Wärmemenge selbst aber, welche erforderlich ist, um die Temperatur des Körpers um 1° zu erhöhen, nennt man seine specifische Wärme. Zwei Körper besitzen gleiche Wärmecapacität, wenn sie bei gleicher Masse dieselbe Wärmemenge nöthig haben, damit ihre Temperatur um 1° erhöht werde; ihre Capacität ist verschieden, wenn sie zu diesem Behufe ungleicher Wärmemengen bedürfen. So können zwei Körper bei gleicher Temperatur und Masse sehr verschiedene Wärmemengen enthalten. Zur Bestimmung der Wärmecapacität hat man verschiedene Methoden.

124. Die sogenannte Mischungsmethode besteht darin, daß man eine bestimmte Menge des zu untersuchenden Körpers bis auf eine gewisse Temperatur erwärmt und darauf in ein Gefäß mit Wasser bringt, dessen Temperatur durch die Abkühlung des Körpers bis zu einem gewissen Grade erhöht wird. Es sei M die Masse des Körpers und T seine Temperatur vor dem Versuche, m die Masse des Wassers und t dessen Temperatur vor dem Versuche, t' endlich die Temperatur des Wassers nach dem Versuche; dann ist die Temperaturerniedrigung, welche der erwärmte Körper durch seine Berührung mit dem Wasser erlitten hat, $T - t'$, und die Wärmemenge, welche er verloren hat, läßt sich durch $M(T - t')$ ausdrücken. Das Wasser aber hat eine Temperaturerhöhung von $t' - t$ erfahren und da-

Digitized by Google

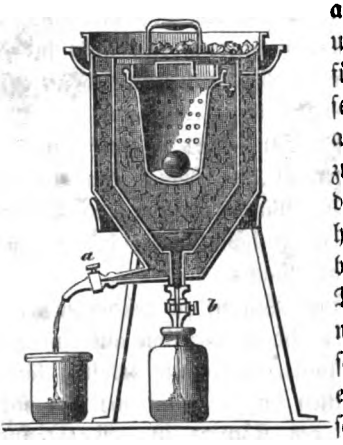
her die Wärmemenge m (t' — t) gewonnen. Demnach hat man für die Wärmecapacität des Körpers den Ausdruck $\frac{m\,(t' - t)}{M\,(T - t')}$. Uebrigens ist hierbei noch auf den Wärmeverlust durch das Gefäß Rücksicht zu nehmen.

Diese Methode läßt sich sowohl bei festen als auch bei flüssigen Körpern anwenden, nur darf der zu untersuchende Körper nicht in der Flüssigkeit auflöslich sein. Mischt man 1 Pfd. Quecksilber von 120° mit 1 Pfund Wasser von 18°, so beträgt die Temperatur der Mischung 21°. Das Quecksilber hat also 120 — 21 — 99° an das Wasser abgegeben, wodurch die Temperatur des letzteren nur um 21 — 18 — 3° erhöht worden ist. Die Wärmecapacität des Quecksilbers ist also gleich $\frac{3}{99}$, d. h. es enthält bei gleicher Temperatur 33 Mal weniger Wärme als das Wasser.

Eine zweite Methode, die specifische Wärme zu bestimmen, besteht darin, daß man den Körper, nachdem man ihn auf eine bestimmte Temperatur erhoben hat, im luftleeren Raume erkalten läßt. Man sieht nämlich ein, daß das Erkalten um so langsamer vor sich gehen muß, je größer die Capacität des Körpers ist. Petit und Dulong bedienten sich dabei eines Thermometers mit cylindrischem Gefäße. Das letztere wurde in ein polirtes Gefäß von Silber, das auch den zu untersuchenden Körper enthielt, gesteckt. Wenn der Körper ein fester war, so wurde er pulverisirt und das Pulver dergestalt in das Metallgefäß gedrückt, daß es das Gefäß des Thermometers ganz umgab. Diese Vorrichtung brachten sie in einen bleiernen Behälter, dessen Deckel in der Mitte eine metallene Hülse hatte, in welche das Thermometer eingekittet wurde. Während des Versuches befand sich dieses Behälter in einem Oel- oder Wasserbade von constanter Temperatur. Sobald es luftleer gemacht war, wurde die Zeit beobachtet, binnen welcher das Thermometer um eine bestimmte Anzahl von Graden fiel. Diese Zeit steht im graden Verhältnisse mit der Wärmecapacität des Körpers. Nennt man m die Masse irgend eines Körpers, m' die eines anderen, c und c' die entsprechenden Wärmecapacitäten, so sind die Wärmemengen, welche diese Körper durch eine Temperaturerniedrigung von t° verloren haben, beziehungsweise mct und m'c't. Bezeichnen nun τ und τ' die Erkaltungszeiten, so hat man mc : m'c' = τ : τ' oder $\frac{mc}{m'c'} = \frac{\tau}{\tau'}$ für das Verhältniß der Wärmecapacitäten dieser Körper. Diese Methode giebt jedoch nur dann richtige Resultate, wenn beide Körper ihre Wärme mit gleicher Leichtigkeit an die Silberhülle abgeben.

Digitized by Google

Eine dritte Methode rührt von Lavoisier und Laplace her. Sie benutzten dabei einen Apparat, welchen man Calorimeter nennt. Derselbe besteht aus drei in einander steckenden Gefäßen von Eisenblech. Der Zwischenraum zwischen dem ersten und zweiten, wie auch derjenige zwischen dem zweiten und dritten ist mit Eisstücken angefüllt; das aus diesen gebildeten Wasser fließt durch die Hähne a und b ab. In das innerste Gefäß wird der zu untersuchende Körper gebracht, nachdem man ihn durch Eintauchen in heißes Oel oder Wasser bis zu einer bestimmten Temperatur erwärmt hat. Die von ihm abgegebene Wärme wird nun lediglich zum Schmelzen des Eises verwendet. Sobald er auf 0° erkaltet ist, wird das entstandene Wasser durch den Hahn b abgelassen und dessen Menge bestimmt. Sei nun m die Masse, t die anfängliche Temperatur und c die zu suchende Wärmecapacität des Körpers, m′ aber die Menge des geschmolzenen Eises. Dann ist die Wärmemenge des Körpers = mct. Nun wissen wir aber, daß 79 Wärmeeinheiten nöthig sind, um 1 Pfund Eis in Wasser von 0° zu verwandeln, also 79. m′ Wärmeeinheiten zur Schmelzung von m′ Pfund Eis. Daher hat man mct = 79. m′ und $c = \frac{79.\,m'}{m\,t}$.



Das Eis zwischen dem ersten und zweiten Gefäße hat nur den Zweck, die Wärme der äußeren Umgebung abzuhalten.

Um genaue Resultate zu erhalten, muß man auch noch die Wärme, welche das äußerste Gefäß selbst an das Eis abgiebt, in Betracht ziehen. Ist nun M die Masse dieses Gefäßes, T seine Temperatur, C die Capacität und M′ die ganze von dem Körper und dem Gefäße geschmolzene Eismenge, so hat man mct + MCT = M′, woraus $c = \frac{M' - MCT}{m\,t}$ folgt.

Regnault fand für die specifische Wärme folgender Körper im Mittel die beigesetzten Zahlen. Er bediente sich der Mischungsmethode, indem er die Körper in einem durch Wasserdämpfe gleichför-

Digitized by Google

mig erhitzten Raume erwärmte und dann in Waſſer oder Oel von bekannter Temperatur brachte.

Waſſer	1,0000	Antimon	0,0507
Eiſen	0,1138	Zinn	0,0569
Zink	0,0955	Platin	0,0324
Kupfer	0,0951	Gold	0,0324
Silber	0,0570	Schwefel	0,2026
Arſenik	0,0814	Kohle	0,2411
Blei	0,0314	Queckſilber	0,0333
Wismuth	0,0308	Glas	0,1977

Die ſpecifiſche Wärme eines und deſſelben Körpers ändert ſich mit ſeiner Dichtigkeit; ſie wird um ſo geringer, je mehr die Dichte zunimmt. So iſt nach Regnault die ſpecif. Wärme des ſchmiedbaren Kupfers 0,095, die des gehämmerten, alſo dichteren 0,093. Ebenſo fand er für die Holzkohle die ſpecifiſche Wärme 0,2415, für die dichtere Steinkohle 0,2009 und für den Diamanten 0,1469.

Die Verſuche Dulong's und Petit's haben ferner dargethan, daß die Wärmecapacität für höhere Temperaturen größer als für geringere iſt. Man ſieht dies aus nachſtehender Tabelle.

	Mittlere Capacität zwiſchen 0° u. 100°	zwiſchen 0° u. 300°
Eiſen . . .	0,1098	0,1218
Queckſilber . .	0,0330	0,0350
Zink . . .	0,0927	0,1015
Antimon . .	0,0507	0,0549
Silber . . .	0,0557	0,0611
Kupfer . . .	0,0949	0,1013
Platin . . .	0,0335	0,0355

Die ſpecifiſche Wärme ſteht aber auch im innigen Zuſammenhange mit der chemiſchen Beſchaffenheit der Körper. Dulong und Petit fanden nämlich, daß man immer eine conſtante Zahl erhält, wenn man das Atom- oder Miſchungsgewicht eines einfachen Stoffes mit ſeiner ſpecifiſchen Wärme multiplicirt. Nachherige genauere Beſtimmungen der Atomgewichte ſchienen dieſem Geſetze zu widerſprechen, bis Regnault's Unterſuchungen wieder allen Zweifel entfernten. Demnach verhalten ſich die ſpecifiſchen Wärmen der ſogenannten einfachen Stoffe umgekehrt wie ihre Miſchungsgewichte. Man kann daher auch das Atomgewicht eines chemiſch einfachen Körpers finden, wenn man das Product aus dem Atomgewichte und der ſpecifiſchen Wärme durch letztere dividirt. Durch Neumann und

Digitized by Google

Regnault ist dieses Gesetz noch auf alle Körper von gleicher atomistischer und ähnlicher chemischer Zusammensetzung erweitert, indem auch bei ihnen die Atomgewichte im umgekehrten Verhältnisse zu den specifischen Wärmen stehen. Hieran reiht sich die Entdeckung Schröders, daß in vielen Fällen die specifische Wärme eines zusammengesetzten Körpers gleich ist der Summe der specifischen Wärme seiner Bestandtheile in demjenigen Condensationszustande, in welchem sie in der Verbindung vorkommen.

125. Die Wärmecapacität gasförmiger Körper bestimmt man nach Berard und Delaroche am sichersten dadurch, daß man das getrocknete Gas, nachdem es in einer mit kochendem Wasser umgebenen Röhre auf 100° erwärmt ist, in einem gleichförmigen Strome durch ein Schlangenrohr gehen läßt, das sich in einem abgesonderten Wasserbehälter befindet. Durch ein Thermometer erfährt man die Temperatur, mit der es in das Rohr einströmt, durch ein zweites diejenige Temperatur, mit welcher es das Rohr verläßt. Während nun das warme Gas durch das Schlangenrohr hindurchstreicht, wird das umgebende Wasser allmälig erwärmt, so daß es zuletzt, wenn es in jedem Augenblicke eben so viel Wärme empfängt, als es an die Umgebung verliert, eine constante Temperatur annimmt. Diese Temperatur muß natürlich um so höher sein, je mehr Wärme das Gas dem Wasser zuführt. Weil aber in gleichen Zeiten gleiche Gasvolumina durch das Rohr streichen, so müssen bei verschiedenen Gasen die Temperaturerhöhungen des Wassers den Wärmemengen proportional sein, welche gleiche Volumina dieser verschiedenen Gase an das Wasser abgeben. Also werden sich auch die Capacitäten derselben direct wie jene Wärmemengen verhalten.

Man kann auch die verschiedenen Gase der Reihe nach bei gleicher Temperatur und unter demselben Drucke so lange durch das Schlangenrohr strömen lassen, bis das Wasser durch jedes um eine gleiche Anzahl von Graden erwärmt ist. Die Wärmecapacitäten verhalten sich dann wie die Volumina, welche durch das Schlangenrohr gehen müssen, um das Wasser auf denselben Grad zu erwärmen. Doch wird dabei vorausgesetzt, daß das Gefäß während des Versuches keine Wärme an die Umgebung verliert. Da dies aber unmöglich ist, so gebrauchten Delaroche und Berard die Vorsicht, daß sie das Gefäß vor dem Versuche unter die Temperatur der Umgebung erkalteten und den Versuch selbst in dem Moment beendigten, wo die Temperatur des Gefäßes eben so hoch über der Temperatur der Umgebung stand als sie anfänglich unter derselben gewesen war.

Digitized by Google

Hierdurch nimmt das Gefäß während der ersten Hälfte des Versuches eben so viel Wärme aus der Umgebung auf als es während der zweiten Hälfte an dieselbe abgiebt.

Berard und Delaroche erhielten nach beiden Versuchsweisen übereinstimmende Resultate.

Kennt man einmal die Verhältnißzahlen der Capacitäten für gleiche Gasvolumina, so braucht man jene nur durch das specifische Gewicht der betreffenden Gase zu dividiren, um die Capacität für gleiche Gewichte zu erhalten. Die Capacität der atmosphärischen Luft wird dabei gewöhnlich als Einheit angenommen, um durch sie die Capacitäten der anderen Gase auszudrücken. Will man aber die specifische Wärme der Gase an die der festen Körper reihen, so muß man sie mit der specifischen Wärme des Wassers in Beziehung bringen. Zu diesem Behufe läßt man eine bestimmte Menge erwärmter atmosphärischer Luft durch das Schlangenrohr streichen, bestimmt die dem Wasser hierdurch mitgetheilte Wärme und ermittelt dann nach der früher erläuterten Mischungsmethode die Capacität der Luft in Beziehung auf das Wasser.

Die folgende Tafel enthält nach den Versuchen von Delaroche und Berard die specifische Wärme verschiedener Gase bei gleichem Drucke.

Namen der Gase	Capacität für gleiche Volum.	Capacität für gleiche Gewichte.	
		Luft = 1	Wasser = 1
Atmosphärische Luft	1,000	1,000	0,267
Sauerstoff . . .	0,976	0,885	0,236
Wasserstoff . . .	0,903	12,340	3,294
Stickstoff . . .	1,000	1,032	0,275
Kohlenoxyd . .	1,034	1,080	0,288
Stickstoffoxydulgas	1,350	0,888	0,237
Kohlensäure . .	1,258	0,828	0,221
Oelbildendes Gas	1,553	1,576	0,421
Wasserdampf . .	1,960	3,136	0,847

Die erwähnten Versuche gaben die Wärmecapacität der Gase bei constantem Drucke, während ihr Volumen die Freiheit hatte, sich der Erwärmung gemäß auszudehnen. Es kommt nun darauf an, die Wärmecapacität für ein constantes Volumen und einen veränderlichen Druck zu erfahren, oder zu wissen, welche Wärmemenge nöthig

Digitized by Google

ist, um die Gase um 1° zu erwärmen, wenn sie sich nicht frei ausdehnen können. Wenn man eine gegebene Luftmasse, welche durch eine Temperaturerhöhung von t° unter constantem äußeren Drucke eine Ausdehnung erlitten hat, wieder auf ihr voriges Volumen zusammenpreßt, so muß sie eine neue Temperaturerhöhung von t' Graden erfahren, woraus folgt, daß die Wärmemenge, welche die Temperatur der gegebenen Luftmasse auf t° erhöht, wenn sie sich frei ausdehnen kann, eine Temperaturerhöhung von t + t' Graden hervorbringt, wenn keine Ausdehnung der Luft erfolgen kann. Ist demnach c die Wärmecapacität bei constantem Drucke und c' diejenige bei constantem Volumen, so hat man $c : c' = t + t' : t$ oder $\frac{c}{c'} = \frac{t + t'}{t}$. Die Wärmecapacität bei constantem Drucke ist also größer als jene bei constantem Volumen.

Zur Ermittelung des Verhältnisses dieser beiden Capacitäten giebt es zwei Wege. Der eine ist, daß man die Temperaturerhöhung t' bestimmt, welche durch die Compression des Gases hervorgebracht wird. Diese Methode gewährt keine große Genauigkeit. Die andere Methode beruht auf der Geschwindigkeit des Schalles in gasförmigen Mitteln. Nach Seite 179 läßt sich diese Geschwindigkeit in einem beliebigen Gase mit der Temperatur t durch die Formel $v = \sqrt{\frac{e}{d}(1 + \alpha t)\, k}$ ausdrücken, wo e die Spannkraft des Gases, d seine Dichtigkeit, α den Ausdehnungscoefficienten und k das in Frage stehende Verhältniß $\frac{c}{c'}$ bezeichnet. Kennt man nun die Schallgeschwindigkeit v aus directen Versuchen oder aus der beobachteten Tonhöhe einer Gassäule (in einer Flöte), so hat man zur Berechnung des Werthes von $\frac{c}{c'}$ die Formel $k = \frac{v^2 d}{e(1 + \alpha t)}$.

Dulong fand aus der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft $\frac{c}{c'} = 1{,}421$, eine Zahl, welche nicht allein für die einfachen Gase, sondern auch für ein Gemenge solcher Gase gilt. Wenn daher 1 Cubikcentimeter Gas, welches in einem Gefäße eingeschlossen ist, die Wärmemenge 1 braucht, um eine Temperaturerhöhung von 1° zu erleiden, so hat dieselbe Gasmasse, wenn sie sich frei ausdehnen kann, die Wärmemenge 1,421 nöthig, damit ihre Temperatur um 1° erhöht werde.

Digitized by Google

Fünftes Kapitel.

Von den Bewegungsgesetzen der Wärme.

126. Die Wärme pflanzt sich auf ähnliche Weise fort wie das Licht. Ein heißer oder warmer Körper sendet nach allen Richtungen Strahlen aus, welche in dem Falle, daß sie mit anderen Körpern in Berührung kommen, wieder Wärme erregend wirken. Man spricht daher mit eben dem Rechte von Wärmestrahlen, wie von Lichtstrahlen. Wenn man ein empfindliches Thermometer dem Feuer eines Heerdes bis auf eine gewisse Entfernung nahe bringt, so bemerkt man ein beträchtliches Steigen des Quecksilbers, wenn auch die zwischen befindliche Luft noch ganz kalt ist. Das Steigen läßt sogleich nach, wenn man zwischen das Feuer und das Thermometer einen Schirm bringt, so daß es also auf keinen Fall von einer Erwärmung der umgebenden Luft herrühren kann. So wird auch im Winter von der strahlenden Wärme des Ofens das Eis der Fensterscheiben aufgethaut, ehe noch die Luft im Zimmer merklich erwärmt ist. Wird aber zwischen den Ofen und die Fensterscheiben ein Schirm gebracht, so bleibt das Eis an allen Stellen, von denen die Strahlen des Ofens durch den Schirm abgehalten werden. Die Wärmestrahlen verbreiten sich mithin durch den lufterfüllten Raum wie die Lichtstrahlen.

Man stelle zwei große sphärische oder paraboliſche Hohlspiegel so gegen einander auf, daß ihre Axen zusammenfallen. Bringt man nun in den Brennpunkt des einen Spiegels ein Stück Zunder, in den Brennpunkt des anderen aber eine glühende Kohle, welche durch einen Blasebalg in ein lebhaftes Verbrennen versetzt werden kann, so wird sich der Zunder in kurzer Zeit entzünden, so, als ob er mit der Kohle in Berührung wäre. Man kann den Zunder aus dem Brennpunkte hinweg und der glühenden Kohle viel näher bringen, ohne daß er sich entzündet. Die Entzündung des Zunders geschieht also nicht durch Erhitzung der zwischenliegenden Luftschichten, sondern nur dadurch, daß von der glühenden Kohle Wärmestrahlen ausgesendet werden, welche sich im Brennpunkte des anderen Spiegels vereinigen. So sendet jeder heiße oder warme Körper Wärmestrahlen aus, welche die Luft durchdringen und in anderen Körpern wieder Wärme erzeugen. Ersetzt man die glühende Kohle durch eine Metallkugel von etwa 300° und den Zunder durch ein gewöhnliches Thermometer, so wird das letztere rasch steigen. Bei Körpern von niedrigerer Temperatur muß man, um ihre Wärmestrahlung nachzu-

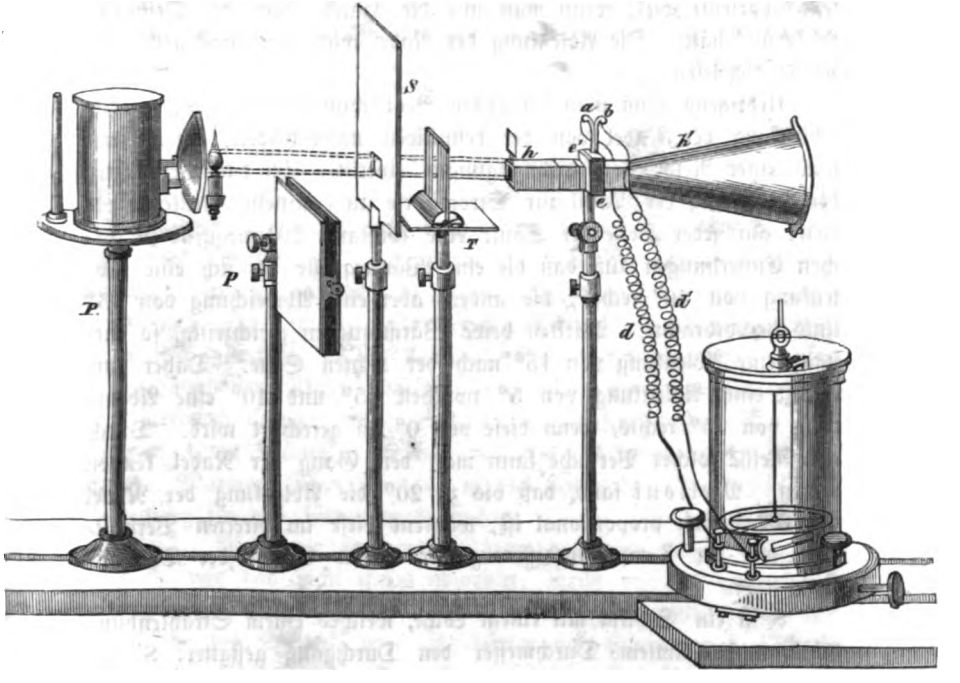
Digitized by Google

weiſen, empfindlichere Thermometer anwenden, z. B. ein Luftthermometer, Rumford's oder Leslie's Differentialthermometer, Inſtrumente, welche wir ſchon früher kennen gelernt haben. Wenn man in den Brennpunkt des einen Hohlſpiegels ein Stück Eis, in den des anderen die Kugel eines Differentialthermometers bringt, ſo zeigt das letztere eine ſehr merkliche Temperaturabnahme, weil es viel weniger Wärme empfängt als es abgiebt.

Der empfindlichſte Apparat gegen die Wärme iſt aber Melloni's ſogenannter Thermomultiplicator. Derſelbe gründet ſich zwar auf die Geſetze der Thermoelektricität, welche wir erſt ſpäter werden kennen lernen, aber ſeine Wirkſamkeit kann, ſo weit ſie zu unſerm jetzigen Zwecke nöthig iſt, ſchon hier zum Verſtändniß gelangen. Wenn man zwei verſchiedenartige Metallſtäbchen, z. B. aus Wismuth und Antimon, ſo zuſammenlöthet, daß ſie eine geſchloſſene Kette von beliebiger Form bilden, ſo entſteht ein mehr oder weniger ſtarker elektriſcher Strom, wenn die beiden Löthſtellen verſchiedene Temperatur haben. Dieſer Strom macht ſich durch ſeine Wirkung auf die Magnetnadel bemerklich, indem er dieſelbe nach der einen oder der anderen Seite aus ihrer Ruhelage entfernt, wenn man ſie der Länge nach in einer gewiſſen Entfernung über oder unter den Strom bringt. Die Ablenkung der Nadel iſt im Allgemeinen der Temperaturdifferenz der Löthſtellen proportional. Die Wirkung kann bedeutend verſtärkt werden, wenn man etwa 30 kleine Nädelchen aus Wismuth und Antimon, von ungefähr 5 Centimeter Länge, abwechſelnd an ihren Enden zuſammenlöthet, ſo daß ſie eine einzige Kette bilden, deren Glieder in der Ordnung w, a, w, a, ... auf einander folgen. Die Stäbchen dürfen ſich nur an ihren Löthſtellen berühren; um daher an anderen Stellen die Berührung zu vermeiden, ſind die Zwiſchenräume mit iſolirenden Subſtanzen ausgefüllt. Die beiden letzten Stäbchen ſtehen mit einem Kupferdraht in Verbindung, welcher in vielfachen Windungen um eine Magnetnadel herumgeht. Sobald die thermoelektriſche Säule an einem ihrer Enden nur im Geringſten erwärmt wird, erfolgt durch den erregten elektriſchen Strom eine Ablenkung der Nadel.

Die folgende Figur zeigt den Apparat, deſſen ſich Melloni bei ſeinen Verſuchen bediente. ee iſt die thermoelektriſche Säule, welche an ihren Enden ſorgfältig mit Ruß überzogen und auf einem Stativ befeſtigt iſt. Bei a und b ſtehen die beiden Enden der Säule mit den Drahtſpiralen d und d' in Verbindung, welche zu den En-

Digitized by Google



den eines überſponnenen Kupferdrahtes führen, der mit etwa 40 Windungen auf einem Metallrahmen aufgewunden iſt. Innerhalb und oberhalb des letzteren befindet ſich eine Magnetnadel. Beide Nadeln ſind an einer und derſelben verticalen Axe dergeſtalt befeſtigt, daß der Nordpol der einen und der Südpol der anderen dieſelbe Richtung haben; beide bilden dann zuſammen ein ſogenanntes aſtatiſches Nadelpaar, welches von der Einwirkung des Erdmagnetismus unabhängig iſt. Die Windungen des Kupferdrahtes ſind mit der Länge des Nadelpaares parallel, wenn ſich dieſes in ſeiner Ruhelage befindet. Das Nadelpaar hängt innerhalb einer Glasglocke an einem Coconfaden ſo, daß der letztere die Mitte der Glocke einnimmt. Die Hülſen h und h' haben den Zweck, die Säule gegen Luftſtrömungen

Digitized by Google

und Seitenstrahlungen zu schützen; die conische Hülse h' dient außerdem noch, um von dieser Seite her die Wärmestrahlen zu concentriren. Der Apparat ist so empfindlich, daß die Nadel schon bedeutend abgelenkt wird, wenn man nur die Hand gegen die Oeffnung der Hülse hält. Die Ablenkung der Nadel wird auf einem getheilten Kreise abgelesen.

Uebrigens muß man bei diesen Beobachtungen die erste, größte Ablenkung der Nadel von der definitiven unterscheiden, welche erst nach einer Reihe von Schwingungen eintritt. Um das Verhältniß der Ablenkung der Nadel zur Stromstärke zu ermitteln, stellte Melloni auf jeder Seite der Säule eine constante Wärmequelle in solchen Entfernungen auf, daß die eine Wärmequelle für sich eine Ablenkung von 40° rechts, die andere aber eine Abweichung von 35° links hervorbrachte. Wirkten beide Wärmequellen gleichzeitig, so entstand eine Ablenkung von 15° nach der rechten Seite. Daher entspricht einer Ablenkung von 5° zwischen 35° und 40° eine Ablenkung von 15° rechts, wenn diese von 0° an gerechnet wird. Durch eine Reihe solcher Versuche kann man den Gang der Nadel kennen lernen. Melloni fand, daß bis zu 20° die Ablenkung der Nadel der Stromstärke proportional ist, während diese im directen Verhältnisse mit der Temperaturdifferenz der beiden Enden der Thermosäule steht.

S ist ein Schirm mit einem Loche, welches einem Strahlenbündel von bestimmtem Durchmesser den Durchgang gestattet; S' ein Schirm von zwei Metallplatten, welcher dient, die Wärmestrahlen in jedem Augenblicke von der Thermosäule abhalten zu können. T ist ein Tischchen, worauf der zu untersuchende Gegenstand gestellt wird.

127. Die Wärmemenge, welche ein Körper ausstrahlt, oder sein Strahlungsvermögen, hängt sowohl von seiner Temperatur als auch von dem Zustande seiner Oberfläche ab. Leslie hat hierüber Versuche angestellt, indem er in den Brennpunkt eines Hohlspiegels die Kugel seines Differentialthermometers und in einiger Entfernung davon in der Richtung der Axe des Spiegels einen hohlen mit heißem Wasser gefüllten Würfel aus Messingblech brachte. Eine Seite des Würfels war polirt, während die übrigen mit verschiedenen Substanzen überzogen waren. Wenn er nun die polirte Seite dem Spiegel zukehrte, so war die Wirkung auf die Kugel des Thermometers bedeutend geringer, als wenn er die mit Ruß überzogene Seite dem Spiegel zuwandte. Daraus folgt, daß die berußte Seite weit mehr Wärme ausstrahlt als die polirte. Auch Melloni

Digitized by Google

stellte hierüber Versuche an, indem er bald die eine, bald die andere Seite des Würfels der Thermometersäule zukehrte. Aus den beobachteten Ablenkungen ergab sich das Verhältniß, in welchem das Ausstrahlungsvermögen der verschiedenen Flächen zu einander steht. Er fand so für das Strahlungsvermögen der folgenden Körper die beigesetzten Zahlenwerthe, wenn das des Kienrußes mit 100 bezeichnet wird.

Kienruß	100	Tusch	85
Bleiweiß	100	Gummilack	72
Hausenblase	91	Metallfläche	12

Metallische Oberflächen strahlen immer weniger Wärme aus als rauhe Oberflächen. Das Strahlungsvermögen eines Körpers ist überhaupt um so geringer, je größer seine Dichtigkeit ist. Daher strahlt eine gegossene Metallplatte mehr Wärme aus als eine gehämmerte und gewalzte. Man kann aber das Strahlungsvermögen einer gehämmerten Platte erhöhen, wenn man ihre Oberfläche ritzt, weil hierdurch weniger dichte Stellen zum Vorschein kommen. Bei Körpern, deren Dichtigkeit durch Druck nicht geändert werden kann, wie bei Marmor, Glas u. dgl., ist das Ritzen der Oberfläche ohne Bedeutung für das Strahlungsvermögen.

128. Wenn die strahlende Wärme auf einen Körper trifft, so wird sie wie das Licht theils absorbirt, theils reflectirt und theils durchgelassen. Auch die Absorption hängt wesentlich von der Oberfläche des Körpers ab. Je härter und glänzender die Oberfläche eines Körpers ist, desto geringer ist sein Absorptionsvermögen. Daher absorbiren metallische Oberflächen nur eine geringe Wärmemenge. Wenn man die Kugel eines Thermometers schwärzt und den Sonnenstrahlen aussetzt, so steigt das Quecksilber viel höher als in einem anderen Thermometer, dessen Kugel nicht geschwärzt ist. Das Absorptionsvermögen der Körper steht überhaupt mit ihrem Ausstrahlungsvermögen in directem Verhältnisse: ein Körper, welcher die Wärme leicht ausstrahlt, muß sie auch leicht absorbiren und umgekehrt. Wenn man nun einen Körper stark erwärmen will, so muß man seine Oberfläche mit Substanzen überziehen, welche die Wärme stark absorbiren. Deshalb werden die Enden der Thermosäule, die Kugel des Differentialthermometers mit Ruß bedeckt, welcher sich durch sein starkes Absorptionsvermögen auszeichnet. Der Ruß absorbirt nicht allein unter allen bekannten Körpern die meiste Wärme, sondern auch die Strahlen aller Wärmequellen in demselben Verhältnisse, was bei der Mehrzahl der übrigen Körper nicht so der Fall ist.

Digitized by Google

Um das Abſorptionsvermögen der Körper zu meſſen, ließ Melloni aus einem dünnen Kupferblech mehrere Scheiben ſchneiden, welche auf der einen Seite mit Ruß, auf der anderen mit einer Schicht der zu unterſuchenden Subſtanz überzogen wurden. Dieſe Scheiben brachte er der Reihe nach vor die Oeffnung des coniſchen Reflectors, in der Art, daß die berußte Seite der Thermoſäule, die andere aber der Wärmequelle zugekehrt war. Zuerſt wurde eine auf beiden Seiten berußte Kupferſcheibe dem Verſuche unterworfen und die Abſorptionsfähigkeit des Kienrußes durch 100 bezeichnet, um diejenige der anderen Stoffe damit vergleichen zu können. Melloni erhielt auf dieſe Weiſe für die angegebenen Wärmequellen folgende Reſultate:

Unterſuchte Körper.	Glühendes Platin	Kupfer von 400°	Kupfer von 100°
Kienruß	100	100	100
Bleiweiß	56	89	100
Hauſenblaſe . . .	54	64	91
Tuſch	95	87	85
Gummilack	47	70	72
Blanke Metallfläche .	13,5	13	13

Man ſieht leicht, daß die Reflexion der Wärme um ſo größer ſein muß, je geringer ihre Abſorption iſt. Daher reflectiren metalliſche Oberflächen ſehr viel Wärme. Dies beſtätigt auch der früher erwähnte Verſuch mit dem Hohlſpiegel, welcher die empfangenen Strahlen nach dem Brennpunkte ſendet, ohne ſich ſelbſt zu erwärmen. Man bemerkt auch, daß die Wärmeſtrahlen auf dieſelbe Weiſe reflectirt werden, wie die Lichtſtrahlen, denn im Hohlſpiegel fallen die Vereinigungspunkte beider zuſammen. So reflectiren faſt alle Körper mehr oder weniger Wärme. Den ſtärkſten Gegenſatz zu polirten Metallen bildet in dieſer Hinſicht der Ruß, welcher beinahe alle Wärmeſtrahlen abſorbirt.

Außer der regelmäßigen Reflexion der Wärme findet aber auch noch eine Zerſtreuung derſelben nach allen Richtungen ſtatt, gerade ſo wie beim Lichte. Die Thermoſäule zeigt dies am deutlichſten. Läßt man nämlich durch eine Oeffnung im Laden eines dunklen Zimmers Sonnenſtrahlen auf die gegenüberſtehende Wand fallen, ſo entſteht auf dieſer ein heller Fleck, welcher nicht nur das Licht ſondern auch die Wärme nach allen Richtungen zerſtreut. Denn kehrt man den

Digitized by Google

hellen Fleck die Thermosäule zu, so erhält man immer einen Ausschlag der Nadel, wo auch das Instrument aufgestellt werden mag. Verschließt man aber die Oeffnung im Laden, so geht die Nadel sogleich auf den Nullpunkt der Theilung zurück. Aus diesem Versuche folgt einmal, daß die Ablenkung der Nadel nicht die Wirkung einer regelmäßigen Reflexion sein kann, und zweitens, daß sie auch nicht von einer Erwärmung der von der Sonne beschienenen Stelle herrühren kann, weil in diesem Falle auch nach dem Verschließen der Oeffnung noch eine Wirkung auf die Säule bemerkbar sein müßte.

129. Ein Körper wird natürlich um so weniger Wärme durchlassen, je mehr er davon reflectirt oder absorbirt. Genauere Versuche über den Durchgang der Wärmestrahlen durch verschiedene Körper hat Melloni vermittelst der Thermosäule angestellt. Er gebrauchte dabei vier verschiedene Wärmequellen, nämlich die Locatelli'sche Lampe, ein geschwärztes, auf 400° erwärmtes Kupferblech, eine Spirale von Platindraht, welche durch eine Weingeistflamme rothglühend erhalten wurde und einen mit heißem Wasser gefüllten Würfel aus Messingblech, welcher sich durch eine Lampe auf constanter Temperatur erhalten ließ. Diese Wärmequellen brachte er der Reihe nach auf den Träger P (s. die obige Figur), während der zu untersuchende Körper auf T gesetzt wurde. Aus den Ablenkungen der Nadel ging hervor, daß gleich dicke Platten verschiedener Körper sehr ungleiche Mengen strahlender Wärme durchlassen. Die Resultate von Melloni's Versuchen enthält folgende Tabelle.

Namen der Körper.	Locatelli'sche Lampe.	Glühende Platinspirale.	Geschwärztes bis zu 400° erwärmtes Kupferblech	Geschwärztes bis zu 100° erwärmtes Messingblech
Freie Strahlung der Wärmeq.	100	100	100	100
Steinsalz	92	92	92	92
Flußspath, klar, farblos .	78	69	42	33
Kalkspath	39	28	6	0
Spiegelglas	39	24	6	0
Bergkrystall	38	28	6	0
Gyps, krystallisirt . . .	14	5	0	0
Citronensäure	11	2	0	0
Alaun	9	2	0	0
Schwarzes Glas 1 mm dick	26	25	12	0
Schw. Glimmer, 0,9 mm dick	20	20	9	0
Eis	6	0	0	0

Digitized by Google

Man ſieht aus dieſer Tafel, daß die Fähigkeit eines Körpers, Wärmeſtrahlen durchzulaſſen, in keiner beſtimmten Beziehung zu ſeiner Durchſichtigkeit ſteht. So ſind z. B. Steinſalz, Kalkſpath, Gyps beinahe von gleicher Durchſichtigkeit, laſſen aber die Wärme in ſehr ungleicher Menge durch. Schwarzes Glas und ſchwarzer Glimmer ſind beinahe ganz undurchſichtig, geſtatten aber dennoch einer ziemlich beträchtlichen Wärmemenge den Durchgang. Ferner ſieht man, daß die Strahlen verſchiedener Wärmequellen von einem und demſelben Körper nicht mit gleicher Leichtigkeit durchgelaſſen werden. Man hat hieraus geſchloſſen, daß die Strahlen verſchiedener Wärmequellen von ungleicher Beſchaffenheit ſind. Dieſe Verſchiedenheit zeigt ſich auch darin, daß die von einem Körper durchgelaſſenen Wärmeſtrahlen durch einen anderen mit größerer oder geringerer Leichtigkeit gehen. So werden Wärmeſtrahlen, welche durch eine Glasplatte gegangen ſind, von einer Alaunplatte gänzlich abſorbirt, obgleich dieſelbe Alaunplatte faſt alle Wärmeſtrahlen durchläßt, welche vorher eine Schicht Citronenſäure durchdrungen haben. Es findet alſo zwiſchen den Wärmeſtrahlen ein ähnlicher Unterſchied ſtatt wie zwiſchen den Lichtſtrahlen, wenn dieſe durch verſchieden gefärbte Mittel gehen müſſen. Melloni nennt die Eigenſchaft der Körper, gewiſſe Wärmeſtrahlen vorzugsweiſe zu abſorbiren und andere vorzugsweiſe durchzulaſſen, Diathermanſie, welche er von der Diathermanität unterſcheidet. Die letztere iſt nämlich die Fähigkeit eines Körpers, überhaupt einen beſtimmten Antheil der einfallenden Strahlen durchzulaſſen; ſie gleicht der Durchſichtigkeit des Körpers, während die Diathermanſie der Färbung deſſelben entſpricht.

Körper, welche die Wärme leicht durchlaſſen, nennt Melloni diatherman, ſolche, welche keine Wärme durchlaſſen, atherman.

Im Allgemeinen werden die Wärmeſtrahlen um ſo leichter durchgelaſſen, je höher die Temperatur der Wärmequelle iſt, während die Wärmequellen niedrigerer Temperatur eine größere Menge abſorbirbarer Elemente enthalten.

Ein dicker Körper abſorbirt überhaupt mehr Wärme als ein minder dicker. Bei einem und demſelben Körper iſt aber die Abſorption in den erſten Schichten ſtärker als in den folgenden, ſo daß zuletzt der Verluſt, welchen die durchgehenden Wärmeſtrahlen vermöge der Abſorption erleiden, eine beſtändige Größe wird.

Unſere Tabelle zeigt auch, daß das Steinſalz eine Ausnahme von den übrigen Körpern macht, in ſofern nämlich, als es die Strahlen aller Wärmequellen in demſelben Verhältniſſe durchläßt. Es

Digitized by Google

verhält sich daher zur Wärme, wie vollkommen durchsichtiges Glas zum Lichte, während sich die übrigen Körper zur Wärme, wie die farbigen Mittel zum Lichte verhalten. Von 100 Strahlen, welche auf ein Steinsalzplättchen fallen, werden immer 92 durchgelassen, wobei die Dicke des Plättchens innerhalb gewisser Grenzen von gar keinem Einflusse ist. Hieraus folgt, daß die übrigen 8 Strahlen, welche ungefähr $^1/_{12}$ der einfallenden Wärmemenge ausmachen, nicht durch Absorption, sondern durch Reflexion an der vorderen und hinteren Fläche des Plättchens verloren gehen. Das Steinsalz läßt also die Wärme ohne merkliche Absorption hindurch. Auch bei einer Platte von Glas oder Quarz beträgt die Reflexion an den erwähnten Flächen $^1/_{12}$ der einfallenden Wärmestrahlen, während ein großer Theil absorbirt wird. Durch eine Glasplatte von 8 Millimeter Dicke z. B. gehen von 100 einfallenden Strahlen 23 und durch 6 Platten, welche zusammen eine Dicke von 8 Millimeter haben, nur 15 hindurch. Die Absorption der Wärme ist in beiden Fällen dieselbe; daher kann der größere Verlust, welcher im zweiten Falle stattfindet, nur von der Reflexion herrühren, welche die Wärme bei ihrem Durchgange durch die verschiedenen Platten erleidet. Bezeichnet man durch 1 die Intensität der einfallenden Wärme, durch r diejenige Quantität, welche durch Reflexion an den beiden Grenzflächen einer Platte verloren geht, so hat man für die Intensität der Wärme, welche durch 1 Platte hindurchgeht, offenbar $1 - r$, und daher für die Intensität der Wärme, welche durch alle 6 Platten hindurchgegangen ist, $(1 - r)^6$. Demnach ist $1 - r : (1 - r)^6$ oder $1 : (1 - r)^5$ das Verhältniß der beiden Wärmemengen, von denen die eine durch eine einzige, die andere durch 6 Platten hindurchgegangen ist. Dem Versuche zufolge verhalten sich aber diese Wärmemengen wie 23 : 15, mithin auch $23 : 15 = 1 : (1 - r)^5$ oder $(1 - r)^5 = 0{,}65217$, woraus $r = 0{,}082$ folgt, welche Zahl beinahe gleich $^1/_{12}$ ist. Dies ist also wirklich der Verlust, welchen die Wärme bei ihrem Durchgange durch eine Glasplatte vermöge der Reflexion erleidet. Eben so ist es bei einer Quarzplatte.

130. Wenn die Wärmestrahlen in einen diathermanen Körper eintreten, so werden sie wie die Lichtstrahlen gebrochen. Man kann sich hiervon leicht überzeugen, wenn man auf das zur Thermosäule gehörige Tischchen ein Prisma aus Steinsalz setzt. Die Strahlen, welche von irgend einer Wärmequelle aus durch die Oeffnung des Schirmes gehen, werden dann bei ihrem Durchgange durch das Prisma von der anfänglichen Richtung abgelenkt, so daß man der Säule eine schiefe

Digitized by Google

Stellung geben muß, um einen Ausschlag der Nadel hervorzubringen. Sobald man die Säule aus der Richtung der gebrochenen Strahlen herausdreht, geht die Nadel auf den Nullpunkt der Theilung zurück.

Auf der Brechbarkeit der Wärmestrahlen beruht auch die Wirkung des Brennglases.

Weil das Steinsalz die Wärmestrahlen unter allen bekannten Körpern am vollständigsten durchläßt, so ist ein daraus verfertigtes Prisma vorzugsweise geeignet, die Vertheilung der Wärme im Sonnenspectrum kennen zu lernen. Aus den Versuchen ergiebt sich, daß die Sonne Wärmestrahlen von sehr verschiedener Brechbarkeit aussendet und daß der Ort der größten Wärme des Sonnenspectrums noch etwas jenseits der rothen Strahlen liegt. Nach Seebeck ist dieser Ort mit der chemischen Natur der Substanz, aus welcher das Prisma verfertigt ist, veränderlich. So fallen bei einem Crownglasprisma die meisten Wärmestrahlen in's Roth, bei einem mit Schwefelsäure gefüllten Prisma in's Orange und bei einem mit Wasser gefüllten in's Gelbe.

Im Allgemeinen werden die Wärmestrahlen, welche heiße Quellen aussenden, stärker gebrochen, als solche Strahlen, welche von minder heißen Wärmequellen kommen. Hiermit hängt auch die Diathermanität der Körper zusammen. Es zeigt sich nämlich, daß die diathermanen Körper vorzugsweise die stärker brechbaren Strahlen durchlassen, während sie die weniger brechbaren vorzugsweise absorbiren.

131. Wie das Licht, so zeigt auch die Wärme unter den gehörigen Umständen Polarisationserscheinungen. Auch hierüber hat Melloni zahlreiche Versuche angestellt. Er gebrauchte dazu eine metallene Röhre, an deren Enden ein Ring drehbar war. In jedem dieser Ringe befand sich eine Säule von 8 — 10 ganz dünnen Glimmerplättchen, welche so auf einander lagen, daß die Richtung der optischen Axe für alle dieselbe war. Vermittelst einer Linse aus Steinsalz, in deren Brennpunkte die Wärmequelle aufgestellt war, wurde ein Bündel paralleler Wärmestrahlen auf die eine Säule geleitet, während die andere der Thermosäule zugekehrt war. So oft nun die Einfallsebenen beider Säulen mit einander parallel waren, wurde die meiste Wärme durchgelassen, am wenigsten aber, wenn die genannten Ebenen eine gekreuzte Lage zu einander hatten. Bei einer Säule aus 120 sehr dünnen Plättchen tritt das Maximum der durchgehenden Wärme bei einem Einfallswinkel von 33½° ein, welches bekanntlich der Winkel der vollkommenen Polarisation des

Digitized by Google

Lichts ist. Läßt man die Wärmestrahlen, anstatt sie durch die erste Säule zu leiten, von derselben unter dem Polarisationswinkel reflectiren, so erreichen die von der zweiten Säule durchgelassenen Strahlen ihr Maximum, wenn die Einfallsebenen beider Säulen auf einander senkrecht stehen, dagegen ihr Minimum, wenn diese Ebenen mit einander parallel sind. Die Wärme kann daher sowohl durch Reflexion als durch Brechung polarisirt werden.

Man bringe nun zwischen die beiden Säulen ein dünnes Gyps- oder Glimmerplättchen, so daß die aus der ersten Säule kommenden Wärmestrahlen dasselbe senkrecht treffen; dann erleidet die Wärme bei der Drehung des Plättchens ähnliche Modificationen wie das Licht, woraus wir schließen müssen, daß die Wärme auch eine Polarisation durch doppelte Brechung erfährt. Ferner hat man entdeckt, daß ein rhombisches Prisma aus Steinsalz einen polarisirten Wärmestrahl durch doppelte Reflexion auch kreisförmig polarisiren kann. Diese Polarisation kann wie das Licht rechts und links vor sich gehen.

Die strahlende Wärme erleidet also, wenn sie mit verschiedenen Körpern zusammentrifft, mit Ausnahme der Interferenz und Beugung, nahezu dieselben Veränderungen wie das Licht. Hieraus aber zu schließen, daß Licht und Wärme dasselbe sei, wäre ein sehr unüberlegter Einfall. Schon die Art und Weise, wie die Wärme im Sonnenspectrum vertheilt ist, weist diesen Gedanken zurück. Auch hat Melloni eine wirkliche Trennung des Lichts von der Wärme hervorgebracht. Er leitete nämlich irdisches Licht und Sonnenlicht durch eine Wasserschicht, welche zwischen zwei durch Kupferoxyd grün gefärbten Glasplatten enthalten war. Sofern nur die Schicht eine hinreichende Dicke hatte, wurden alle Wärmestrahlen vollständig absorbirt, so daß die hindurchgegangenen von einem Linsenglase concentrirten Lichtstrahlen nicht die mindeste Wirkung auf das empfindlichste Thermoskop verriethen, obschon sie eben so intensiv wie das Sonnenlicht waren. Umgekehrt lassen schwarzes Glas und schwarzer Glimmer nur die Wärme-, aber nicht die Lichtstrahlen durch. Noch weniger wird man aber geneigt sein, Licht und Wärme für identisch zu halten, wenn man alle bekannten Wärmeerscheinungen zusammenstellt und sie den Lichterscheinungen gegenüber hält. Später ein Weiteres hierüber.

132. Wenn ein Körper an irgend einer Stelle mit einer Wärmequelle in Verbindung steht, so verbreitet sich die Wärme von dieser Stelle aus allmälig durch die ganze Masse des Körpers fort, indem jedes Massentheilchen eine gewisse Quantität der empfangenen Wärme

Digitized by Google

an das nächste giebt. Nach einiger Zeit steigt die Temperatur des Körpers nicht mehr, sondern es tritt an allen Stellen desselben ein Gleichgewichtszustand ein, und zwar von dem Augenblicke an, wo jedes Theilchen eben so viel Wärme verliert als es empfängt. Die Schnelligkeit, womit sich die Wärme auf diese Weise in verschiedenen Körpern verbreitet, ist sehr verschieden, wovon uns schon die einfachsten Wahrnehmungen überzeugen. Man braucht nur ein Holzstäbchen und einen gleich langen und dicken Metalldraht mit dem einen Ende ins Feuer zu bringen und an dem anderen Ende zu berühren; man gewahrt dann, daß das Holz ein schlechter, das Metall ein guter Wärmeleiter ist. Die Metalle sind überhaupt die besten, die lockeren Körper aber, wie Asche, Haare, Seide, Wolle, Stroh u. dgl. die schlechtesten Wärmeleiter.

Um die Leitungsfähigkeit verschiedener Körper mit einander zu vergleichen, gaben ihnen Ingenhauß und Franklin die Form kleiner Stäbchen von gleichem Durchmesser und überzogen dieselben mit einer Schicht Wachs. Alsdann wurden sie alle gleich tief in die eine Seitenwand eines mit kochendem Wasser oder heißem Oele gefüllten Blechkastens gesteckt. Indem sich nun die Wärme den einzelnen Stäbchen mittheilte, schmolz das Wachs an ihnen weg und zwar um so weiter, je besser das Stäbchen die Wärme leitete.

Bei der Fortpflanzung der Wärme in einem festen Körper ist es vor Allem wichtig zu wissen, welche Wärmemenge in der Zeiteinheit durch einen als Einheit angenommenen Querschnitt des Körpers geht. Diese Wärmemenge hängt offenbar von der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten des Querschnitts ab, und es ist natürlich, anzunehmen, daß sie damit in geradem Verhältnisse stehe. Alsdann kommt die Natur des Körpers selbst in Betracht, von ihr muß seine Leitungsfähigkeit bestimmt werden. Bezeichnet man nun die Wärmemenge, welche durch den Querschnitt q eines Körpers von der Leitungsfähigkeit k binnen der Zeit τ geht, mit m, die Temperatur an der einen Seite des Querschnittes durch t und diejenige an der anderen Seite durch t', so hat man $m = kq(t - t')\tau$.

Um das Gesetz zu bestimmen, nach welchem sich die Wärme von einem gegebenen Punkte aus in einem Körper vertheilt, wendet man am besten eine lange prismatische Metallstange von quadratischem Querschnitte an, indem man das eine Ende derselben einer constanten Wärmequelle, z. B. der Flamme einer Oellampe, aussetzt. Denkt man sich den Stab durch Querschnitte in sehr dünne Schichten getheilt, so verbreitet sich die Wärme von der erhitzten

Digitized by Google

Stelle aus von Schicht zu Schicht mit einer Geschwindigkeit fort, welche der Leitungsfähigkeit des Körpers entspricht. Weil die Schicht aber auch seitwärts an ihre Umgebung Wärme abgiebt, so sieht man ein, daß jede folgende Schicht weniger Wärme als die nächst vorhergehende empfängt. Daher kann der Stab an dem anderen Ende nicht so heiß werden wie an demjenigen Ende, welches mit der Wärmequelle in Berührung ist. Um die Wärmestrahlung an der Oberfläche möglichst gleichförmig und von der Natur des Stoffes unabhängig zu machen, muß man die Metallstäbe mit Kienruß überziehen, wenn man ihre Wärmeleitungsfähigkeiten mit einander vergleichen will.

Despretz brachte nun senkrecht auf die Axe des prismatischen Stabes von Decimeter zu Decimeter gleich tiefe Löcher an, füllte sie mit Quecksilber und steckte in jedes Loch die Kugel eines empfindlichen Thermometers. Nachdem alle Thermometer stationär geworden waren, bestimmte er den Ueberschuß der Temperatur eines jeden einzelnen über die der umgebenden Luft. Auf diese Weise fand er, daß die Temperatur des Stabes von der erhitzten Stelle aus in einer geometrischen Reihe abnimmt, wenn die Entfernungen von der Wärmequelle in einer arithmetischen Reihe wachsen.

Für das numerische Verhältniß der Leitungsfähigkeit verschiedener Metalle erhielt Despretz folgende Resultate:

Gold . .	1000	Eisen . .	374
Platin .	981	Zink . .	363
Silber .	973	Zinn . .	303
Kupfer .	898	Blei . .	180

133. Tropfbare Flüssigkeiten pflanzen die Wärme vorzugsweise durch Strömung fort, indem die erwärmten Theilchen in der kälteren Masse aufsteigen und dieser ihre Wärme allmälig abgeben. Bringt man in die Flüssigkeit kleine Körperchen, welche mit ihr gleiches specifisches Gewicht haben, z. B. Bernsteinpulver in Wasser, so gewahrt man eine Strömung, welche in der Mitte aufwärts und an den Wänden des Glasgefäßes abwärts geht. Wird aber die Flüssigkeit von oben erwärmt, so muß die Wärme, wie in einem festen Körper, von Schicht zu Schicht fortgeleitet werden. Dies geschieht nur sehr langsam, wovon man sich leicht überzeugt, wenn man die Kugel eines Thermometers in kaltes Wasser senkt, während man auf das letztere heißes Oel gießt.

Die Gase verbreiten die Wärme durch ähnliche Strömungen wie tropfbare Flüssigkeiten. Man sieht dies an dem Aufsteigen der

Digitized by Google

erhitzten Luft in der Nähe eines Ofens, an dem Aufsteigen der Staubtheilchen in einem eben gekehrten Zimmer, wenn die Sonne hineinscheint, u. dgl. Die eigentliche Wärmeleitungsfähigkeit der Gase ist ebenfalls sehr gering. Körper, welche rings von Luft umgeben sind, können nur sehr langsam erwärmt und erkaltet werden, sofern kein Wechsel der Luftschichten stattfindet. Daher kommt es auch zum großen Theile, daß lockere Körper, wie Stroh, Wolle u. s. w., welche sehr viel Luft in ihren Zwischenräumen enthalten, so schlechte Wärmeleiter sind.

Auf dem Aufsteigen der erwärmten Lufttheilchen beruht auch die Luftheizung. Diese wird nach Meißner entweder dadurch bewerkstelligt, daß man die in einem abgeschlossenen kleinen Locale vermittelst eines Ofens stark erwärmte Luft durch eine 4—5 Fuß über dem Boden befindliche Oeffnung in die zu heizenden Zimmer leitet, während die erkaltete Luft durch eine am Fußboden angebrachte Oeffnung in das Local zurückkehrt, oder auch dadurch, daß man den Ofen mit einem thönernen oder metallenen Schirm umgiebt, welcher etwa 4—6 Zoll von ihm absteht. Während nun die in dem Zwischenraume zwischen Schirm und Ofen erwärmte Luft aufsteigt und sich im Zimmer verbreitet, strömt von unten kältere Luft zu. Anstatt einen Schirm anzubringen, kann man auch durch das Innere des Ofens ein offenes Rohr führen.

134. Ein warmer Körper kann sich auf zweierlei Weise abkühlen, einmal durch Strahlung und dann auch durch gleichzeitige Mittheilung seiner Wärme an das kältere Mittel, in dem er sich befindet. Um die Gesetze des Erkaltens zu erforschen, müssen deshalb diese beiden Punkte besonders bestimmt werden. Dulong und Petit bedienten sich hierzu eines Ballons aus Kupfer, welcher etwa 30 cm im Durchmesser hatte und innen mit Ruß geschwärzt war. Auf dem breiten, wohl abgeschliffenen Rande desselben war eine ebene Glasplatte aufgesetzt, in deren Mitte mit Hülfe eines Korkstopfens ein großes Thermometer mit einer Kugel von 3—6 Centimeter so befestigt war, daß die Kugel die Mitte des Ballons einnahm. Die Glasplatte konnte mit dem Thermometer abgehoben und wieder aufgesetzt werden. Nachdem man das Thermometer bis zu einem bestimmten Grade erwärmt hat, wird es schnell in den Ballon gebracht, welcher sich in einem Wasser- oder Oelbade von constanter Temperatur befindet. Alsdann wird der Ballon vermittelst einer Luftpumpe rasch entleert und der Stand des Thermometers von Minute zu Minute beobachtet. Auf diese Weise ergiebt sich die Geschwindigkeit

Digitized by Google

des Erkaltens oder die Temperaturerniedrigung, welche das Thermometer während 1 Minute erleidet. Die Erkaltung geschieht unter sonst gleichen Umständen um so schneller, je größer die Temperaturdifferenz zwischen dem erkaltenden Körper und dem Erkaltungsorte ist; sie ist aber nicht, wie Newton meinte, dem Temperaturüberschusse des Körpers direct proportional, sondern sie wächst in einem größeren Verhältnisse als dieser; nur für geringere Temperaturüberschüsse ist Newton's Meinung annäherungsweise richtig. Bezeichnet man durch t die erwähnte Temperaturdifferenz, so läßt sich die Erkaltungsgeschwindigkeit des Körpers im leeren Raume von constanter Temperatur durch die Formel $M(a^t - 1)$ ausdrücken, in welcher M, a beständige Größen sind und zwar $a = 1{,}0077$. Nach dieser Formel nimmt die Erkaltungsgeschwindigkeit ab, wie die Glieder einer geometrischen Reihe, vermindert um eine beständige Größe, wenn die Temperaturüberschüsse des Körpers eine arithmetische Reihe bilden. Natürlich hängt die Erkaltung unter sonst gleichen Umständen wesentlich von der Oberfläche des Körpers ab. Auch zeigten die Versuche Dulong's und Petit's, daß die Erkaltungsgeschwindigkeit mit dem Durchmesser der Thermometerkugeln im umgekehrten Verhältnisse steht.

Wenn der Körper in der Luft oder in irgend einem anderen Gase erkaltet, so geschieht dies, wie schon bemerkt, theils durch Strahlung nach dem angeführten Gesetze, theils durch seine Berührung mit dem gasförmigen Mittel. Um den Wärmeverlust, welchen der Körper durch das Gas erleidet, zu bestimmen, wurde in den obigen Ballon irgend ein Gas, wohl getrocknet, geleitet und von der gesammten Erkaltung des Körpers die durch Strahlung hervorgebrachte abgezogen. Die vom Gase bewirkte Erkaltung ist unabhängig von dem Zustande der Oberfläche des Körpers und vorzugsweise bedingt durch die Temperaturdifferenz zwischen dem Gase und dem erkaltenden Körper; sie kann ausgedrückt werden durch die Formel $m t^b$, wo t die eben erwähnte Differenz, $b = 1{,}233$ und m eine von der Natur des Gases und den Dimensionen des Körpers abhängige Größe ist. Die Erkaltung, welche das Gas bewirkt, ändert sich hiernach in einer geometrischen Progression, falls auch die Temperaturüberschüsse eine solche Reihe darstellen.

Für die gesammte Erkaltung des Körpers hat man also den Ausdruck $M(a^t - 1) + m t^b$.

Digitized by Google

Sechstes Kapitel.

Von den Quellen der Wärme.

135. Die vorzüglichste Wärmequelle für die Erde ist die Sonne. Die Erwärmung, welche die Erde von der letzteren erfährt, ist unter sonst gleichen Umständen um so intensiver, je mehr der Winkel, unter welchem die Wärmestrahlen auffallen, einem rechten nahe kommt. Deshalb muß die Wirkung der Wärme mit dem Steigen der Sonne zunehmen, sie muß größer sein im Sommer als im Winter, wo die Strahlen bei einem niedrigeren Stande der Sonne schräg auffallen, sie muß überhaupt mit der Entfernung vom Aequator nach den Polen hin abnehmen. Unter dem Aequator, wo Tag und Nacht von gleicher Länge sind, wird der Boden zweimal im Jahre rechtwinklig von den Strahlen getroffen und selbst in der übrigen Zeit unter einem Winkel, der nur unbedeutend von einem rechten verschieden ist. Die Wärme ist daher hier das ganze Jahr hindurch ziemlich gleichförmig vertheilt, man bemerkt noch nichts von verschiedenen Jahreszeiten. Diese treten aber immer deutlicher hervor, je weiter man sich vom Aequator entfernt, je größer also die Differenz zwischen Tag und Nacht wird. Man bemerkt aber auch, daß die Wirkung der Sonnenwärme von der Dauer ihres Einflusses abhängen muß. Daher kann es selbst an Orten, welche weit vom Aequator entfernt sind, im Sommer sehr heiß werden, weil die Sonne lange über dem Horizont verweilt. An solchen Orten wird aber auch die Winterkälte um so größer sein, da die Nacht, in welcher die Erde ihre Wärme ausstrahlt, sehr lang ist, während am Tage, wo die Sonnenstrahlen sehr schräg auffallen, nur wenig Wärme mitgetheilt werden kann. Daraus folgt, daß der Unterschied zwischen der Temperatur des Sommers und Winters um so größer werden muß, je mehr man sich vom Aequator entfernt. Außerdem hängt die Wirkung der Sonnenstrahlen noch von mancherlei anderen Umständen ab, so namentlich von der Cultur und Beschaffenheit des Bodens, von der Gestaltung des Landes und Meeres, von der Richtung und Höhe der Gebirgszüge und von der Richtung der herrschenden Winde. Daher kann das Klima einer Gegend keineswegs allein durch ihre Entfernung vom Aequator bestimmt werden.

136. Die Erwärmung, welche ein Körper von den Sonnenstrahlen erleidet, ist um so stärker, je mehr Strahlen von ihm absorbirt werden. Setzt man zwei übereinstimmende Thermometer, von denen das eine eine mit Kienruß geschwärzte Kugel hat, unter denselben Um-

Digitized by Google

ständen der Sonne aus, so steigt das mit der schwarzen Kugel versehene viel höher als das andere. Bringt man nach Franklin verschiedenfarbige Tuchläppchen auf eine Schneefläche, welche von der Sonne beschienen wird, so schmilzt der Schnee zuerst unter den dunklen Läppchen weg, weshalb auch diese tiefer als die helleren einsinken. Daher muß auch die Erwärmung der Erdoberfläche an verschiedenen Orten um so größer sein, je bedeutender ihr Absorptionsvermögen ist. Die Wärmestrahlen der Sonne müssen bei ihrem Eintritt in die Atmosphäre theils durch Reflexion, theils durch Absorption eine Schwächung erleiden, und zwar um so mehr, je größer ihr Weg durch die Atmosphäre, je dichter und trüber die letztere ist. Das Verhältniß der verschiedenen Strahlenarten muß aber dasselbe bleiben, insofern die Atmosphäre für alle Arten von Wärmestrahlen gleich durchdringlich ist. Pouillet bediente sich des folgenden Apparates, um annäherungsweise die Wärmeabsorption der Atmosphäre zu bestimmen. Er besteht aus einem cylindrischen Gefäße g von dünnem Silberblech, das etwa 100 Gramm Wasser faßt. Die obere Fläche dieses Gefäßes ist mit Kienruß sorgfältig geschwärzt. In seiner Mitte befindet sich die Kugel eines Thermometers, dessen Röhre vermittelst eines Korkes in ein Metallrohr hinabreicht. Durch den Knopf k läßt sich das Rohr sammt dem Gefäße um seine Axe drehen, wodurch das Wasser im Gefäße in beständiger Bewegung erhalten und die Wärme möglichst gleichförmig in demselben vertheilt werden kann. Die Scheibe s hat gleichen Durchmesser mit dem Gefäße g, so daß, wenn der Schatten des letzteren gerade auf die Scheibe fällt, die vordere Fläche des Gefäßes gerade rechtwinkelig von den Sonnenstrahlen getroffen wird. Während nun das Wasser von den letzteren erwärmt wird, verliert es zugleich Wärme an die Umgebung, weshalb der Einfluß derselben auf den Versuch in Rechnung gebracht werden muß. Zu diesem Behufe stellt man das Instrument, nachdem das Wasser im Cylinder die Temperatur der umgebenden Luft angenommen hat, im

Digitized by Google

Schatten auf und beobachtet 4 Minuten hindurch die Erkaltung, welche das Wasser durch die Ausstrahlung der berußten Fläche gegen den Himmel erleidet. Hierauf bringt man einen Schirm vor die Fläche und richtet das Instrument so, daß die Sonnenstrahlen senkrecht auf diese Fläche fallen müssen, sobald der Schirm hinweggezogen wird. Die Einwirkung der Sonnenwärme läßt man 5 Minuten hindurch dauern, indem man das Wasser des Cylinders fortwährend in Bewegung erhält. Alsdann fängt man die Sonnenstrahlen durch den Schirm auf und bringt das Instrument wieder in den Schatten, um von Neuem die Temperaturerniedrigung zu beobachten, welche das Wasser während einer Zeit von 4 Minuten erleidet. Ist nun T die in 5 Minuten durch die Sonnenstrahlen bewirkte Temperaturerhöhung, bezeichnen ferner t und t' die Temperaturabnahmen des Wassers während des ersten und letzten Versuches, so hat man für die Temperaturerhöhung δ, welche die Sonne im Wasser hervorbringt, $\delta = T + \frac{t+t'}{2}$.

Pouillet berechnete nun für verschiedene Sonnenstände die Dicke der durchlaufenen Luftschicht und bestimmte dafür die Werthe von δ. Aus diesen Beobachtungen geht hervor, daß der Erwartung gemäß die erwärmende Kraft der Sonnenstrahlen um so mehr abnimmt, je größer ihr Weg durch die Atmosphäre ist, aber auch, daß sie in einem etwas weniger raschen Verhältnisse abnimmt als die Dicke der durchlaufenen Luftschicht wächst. Pouillet fand, daß sich die erhaltenen Resultate ganz gut durch die Formel $\delta = a p^{\varepsilon}$ darstellen lassen, wo a eine constante, von dem Zustande der Atmosphäre unabhängige Größe — 6,72° ist, während sich p von einem Tage zum anderen ändert; ε ist die jedesmalige Dicke der durchlaufenen Luftschicht. Die nach dieser Formel berechneten Werthe stimmen mit den beobachteten ziemlich genau überein. Setzt man in der Formel $\delta = a p^{\varepsilon}$ $\varepsilon = 0$, so ist $\delta = 6°,72$, woraus folgt, daß an der Grenze der Atmosphäre die wärmende Kraft der Sonne so groß ist, daß daselbst 1 Cbctr. Wasser um 6°,72 erwärmt werden würde. Indessen läßt sich aus den gegebenen Beobachtungen, denen sich diese Formel gut anschließt, noch kein allgemein gültiger Schluß auf die directe Wirkung der Sonnenwärme ziehen. Nur so viel geht aus den Versuchen hervor, daß selbst an heiteren Tagen mindestens ½ aller von der Sonne kommenden Wärmestrahlen von der Atmosphäre absorbirt wird.

Indem die Luft einen Theil der Sonnenstrahlen absorbirt, wird

Digitized by Google

sie selbst erwärmt. Die meiste Wärme empfängt sie jedoch von unten her durch die Erdoberfläche, welche die Wärme in einem bedeutend größeren Maße absorbirt und ausstrahlt als die Luft. Aus diesem Grunde muß die Temperatur der letzteren von unten nach oben abnehmen, wie man findet, wenn man einen hohen Berg ersteigt oder sich im Luftballon erhebt. Doch wird sich in diesen beiden Fällen ein verschiedenes Gesetz der Temperaturabnahme der Luft herausstellen, da die Gebirge wegen ihres Absorptions- und Strahlungsvermögens auf die umgebende Luft einen merklichen Einfluß ausüben müssen. Gay Lussac fand bei seiner Luftschifffahrt im Durchschnitt eine Temperaturabnahme von 1° C. für eine Erhebung von 174 Toisen.

137. Wenn man das arithmetische Mittel aus den Temperaturen der Luft zu allen Tagesstunden nimmt, so erhält man die mittlere Temperatur des Tages. Man kann dieselbe auch erhalten, ohne stündliche Beobachtungen anstellen zu müssen, wenn man das Thermometer in mehreren gleichnamigen Stunden, z. B. 4 und 10 Uhr Morgens und 4 und 10 Uhr Abends, beobachtet, oder wenn man vermittelst des bekannten Thermometergraphen das Maximum und Minimum der täglichen Temperatur bestimmt und aus beiden das arithmetische Mittel nimmt.

Dividirt man die mittleren Temperaturen aller Tage eines Monats durch die Anzahl der Tage, so bekommt man die mittlere Temperatur des Monats, und der Durchschnitt aus den mittleren Temperaturen der 12 Monate eines Jahres giebt die mittlere Jahrestemperatur.

Das Mittel aus einer großen Reihe von Jahrestemperaturen ist endlich die mittlere Tempevatur eines Ortes. Da die mittleren Jahrestemperaturen meist nur wenig von einander abweichen, so reicht es zur Bestimmung der mittleren Temperatur eines Ortes schon hin, wenn man jene nur für einige Jahre kennt. Dagegen ist die mittlere Monatstemperatur von einem Jahre zum anderen oft sehr veränderlich. Verbindet man diejenigen Orte derselben Erdhälfte mit einander, welche gleiche mittlere Temperatur haben, so entsteht eine sogenannte isothermische Linie, welche aber dem Aequator nicht parallel ist, wie es der Fall sein müßte, wenn das Klima eines Ortes nur durch seine Entfernung vom Aequator bestimmt würde.

In der Regel ist während der einen Hälfte des Jahres die Lufttemperatur höher, während der anderen Hälfte aber niedriger als die mittlere Jahrestemperatur, woraus sich schließen läßt, daß die

Digitized by Google

letztere einige Mal von dem jährlichen Gange der Wärme erreicht werden muß. In der nördlich gemäßigten Zone findet dies meist den 24. April und den 21. October statt. An diesen Tagen kommt die Temperatur der mittleren Jahreswärme sehr nahe.

138. Von der Oberfläche der Erde aus dringt die Wärme nur sehr allmälig in's Innere, weil der Boden eine sehr geringe Leitungsfähigkeit besitzt. Dagegen verlieren die tieferen Schichten aus demselben Grunde ihre Wärme weniger schnell als die Oberfläche. In geringer Tiefe müssen daher auch die Temperaturschwankungen viel weniger bedeutend sein als an der Erdoberfläche, so daß in einer gewissen Tiefe selbst die jährlichen Temperaturschwankungen verschwinden. So fand Bousſingault in der heißen Zone Amerikas schon in einer Tiefe von 6 Decimetern eine constante Temperatur. Natürlich ist die Tiefe, in welcher die jährlichen Temperaturschwankungen verschwinden, sowohl von der Leitungsfähigkeit des Bodens als auch von der Temperaturdifferenz zwischen der heißesten und kältesten Jahreszeit abhängig, so daß sie nicht wohl für alle Gegenden dieselbe sein kann. Die jährlichen Wärmeveränderungen verschwinden durchschnittlich in einer Tiefe von 25 Metern. Von Lavoiſier wurde in dem Keller der Pariser Sternwarte in einer Tiefe von 27 Metern ein empfindliches Thermometer aufgestellt, welches seit einem halben Jahrhundert die constante Temperatur von 11,82° zeigt.

In einer Tiefe von 8 Metern, wo noch ein geringer Wechsel der Temperatur stattfindet, fällt die Zeit des Maximums der Erdwärme mit der Zeit des Minimums der Lufttemperatur nahe zusammen. An Orten von mittlerer Breite kommt die mittlere Temperatur der Erdoberfläche mit jener der Luft überein, während in größeren Breiten die mittlere Wärme des Bodens höher, in geringeren Breiten niedriger als diejenige der Luft ist.

Die Erfahrung zeigt ferner, daß die Temperatur des Bodens von dem Punkte an, wo die jährlichen Temperaturschwankungen verschwinden, mit wachsender Tiefe zunimmt. Es ergiebt sich dies mit Evidenz aus den Temperaturbestimmungen, die man in tiefen Schachten und arteſischen Brunnen angestellt hat. Diese Zunahme der Bodenwärme beträgt im Durchschnitt auf je 100 Fuß 1° C. Die Erde besitzt also eine ihr eigenthümliche Wärme, welche mit der Tiefe ungefähr auf die angegebene Weise zunimmt. Hiermit hängt es wahrscheinlich zusammen, daß die meisten wasserreichen Quellen, namentlich Mineralquellen, eine Temperatur haben, welche die mittlere des Orts etwas übersteigt. Diese Temperatur ist in den verschiedenen

Digitized by Google

Jahreszeiten faſt dieſelbe, dergeſtalt, daß die Differenz der höchſten und niedrigſten Temperatur in der Regel nur 1 bis 2° beträgt. Kommt aber die Quelle aus einer bedeutenden Tiefe, ſo iſt ihre Temperatur viel höher als die mittlere des Orts und es giebt ſolche, deren Waſſer der Siedhitze ſehr nahe kommt. Am Boden tiefer Landſeen beträgt die Temperatur des Waſſers in der Regel 4°, und Sauſſure fand in den Seen der Schweiz in bedeutenden Tiefen ſogar eine Temperatur von 5°.

Im Sommer und Herbſt iſt die Temperatur des See- und Flußwaſſers in der Tiefe niedriger als an der Oberfläche, weil die oberen Waſſerſchichten theils durch Abſorption der Sonnenſtrahlen, theils durch die warme Luft, welche über die Oberfläche hinſtreicht, erwärmt werden. Dagegen müſſen dieſelben im Winter erkalten, einmal weil ſie mit kalter Luft in Berührung kommen, dann auch, weil ihre Wärme des Nachts durch die Ausſtrahlung bedeutend vermindert wird. Während des Erkaltens werden aber die Schichten an der Oberfläche dichter, ſie ſinken deshalb in die Tiefe hinab und werden durch andere erſetzt, welche gleichfalls erkalten und niederſinken. Dies geht ſo fort, bis die ganze Maſſe auf 4°, wo bekanntlich das Waſſer ſeine größte Dichte hat, erkaltet iſt. Geht von hier an die Erkaltung der oberen Waſſerſchichten noch weiter, ſo werden ſie leichter, indem ſie ſich, wie wir wiſſen, von dieſem Punkte an wieder ausdehnen, ſie ſinken daher auch nicht mehr hinab. Daher kann ſich das Eis nur auf der Oberfläche des Waſſers bilden und ſeine Dicke eine gewiſſe Grenze nicht überſchreiten. Fände für das Waſſer kein Dichtigkeitsmaximum ſtatt, ſo müßte die ganze Waſſermenge auf 0° erkalten, ehe ſich Eis bilden könnte, ſie würde dann bis auf den Grund erſtarren.

Das Meerwaſſer hat wegen ſeines Salzgehaltes einen tieferen Gefrierpunkt als das ſüße Waſſer, auch iſt um deſſelben Umſtandes willen die Temperatur, für welche es im Maximum ſeiner Dichtigkeit iſt, viel niedrigerer. Nach Despretz findet das Dichtigkeitsmaximum des Meerwaſſers bei — 3,67° ſtatt, wovon er ſich dadurch überzeugte, daß er daſſelbe zur Conſtruction von Thermometern benutzte, an denen er die Ausdehnung dieſes Waſſers beobachtete. Die Temperatur des Dichtigkeitsmaximums liegt alſo unterhalb des Gefrierpunktes und kann mithin nur dann beobachtet werden, wenn das Meerwaſſer unter jenen Punkt erkaltet, ohne zu gefrieren. Indem das Meerwaſſer gefriert, muß die Concentration des flüſſig bleibenden Theiles zunehmen; das gebildete Eis iſt aber eben ſo rein als das des ſüßen Waſſers. In der kalten Zone müſſen die oberen Meeresſchichten

Digitized by Google

nicht allein wegen ihrer Temperaturerniedrigung, sondern auch zufolge der bei der Eisbildung wachsenden Concentration des Wassers an Dichte zunehmen und deshalb zum Theil in die Tiefe hinabsinken. Hiernach sollte in der Tiefe der Polarmeere eine größere Kälte als an der Oberfläche derselben herrschen. Dennoch haben die Beobachtungen von Mulgrave, Scoresby, Roß und Parry zu dem Resultate geführt, daß in der Tiefe die Temperatur höher ist. Es folgt hieraus die Möglichkeit, daß die Temperatur des Meerwassers von unten her in Folge der inneren Erdwärme erhöht wird, wofür sich noch etwa die Beobachtungen von Peron und Duperrey anführen lassen, nach welchen die mittlere Temperatur der Meeresfläche stets höher als die der Luft ist.

Dagegen nimmt in den Tropen die Temperatur der Meere mit der Tiefe ab. Nach Humboldt rührt dies von einem Meeresstrome her, welcher in der Tiefe die Gewässer der Pole dem Aequator zuführt.

139. Wenn die Wärme gegen den Mittelpunkt der Erde hin wirklich auf die angegebene Weise beständig zunimmt, so müssen sich im Mittelpunkte selbst alle Körper in einem glühenden und geschmolzenen Zustande befinden. Hiervon bemerken wir freilich auf der Oberfläche nichts, weil die erkaltete Erdkruste eine sehr geringe Leitungsfähigkeit besitzt.

Man kann es als ausgemacht ansehen, daß sich die Temperatur der ganzen Erde seit 2000 Jahren nicht merklich vermindert hat. Im entgegengesetzten Falle müßte sich die Erdkugel in Folge der Erkaltung zusammengezogen haben und darum ihre Umdrehungszeit kürzer geworden sein. Laplace hat aber bewiesen, daß sich die letztere seit Hipparch's Zeiten nicht um 0,01 Secunde vermindert hat. Es scheint also, daß die Temperatur der ganzen Erde seit der historischen Zeit einen gewissen Gleichgewichtszustand erreicht hat, indem der Erde die Wärme, welche sie durch Strahlung verliert, von außen her wieder ersetzt wird.

Aus der inneren Erdwärme lassen sich auch sehr einfach und mit allen Nebenumständen die vulkanischen Erscheinungen nebst den Erdbeben erklären. Man sieht nämlich leicht, daß Wasser, wenn es in jene Tiefen dringt, wo Glühhitze herrscht, in sehr elastische Dämpfe übergehen muß, welche einen Ausweg suchen und dabei die erwähnten Wirkungen hervorbringen. Auch eine Zersetzung des Wassers kann stattfinden, sobald es mit oxydirbaren Stoffen in Berührung kommt. Das hierdurch entwickelte Wasserstoffgas und jene Dämpfe

Digitized by Google

kann man als die Hauptursache betrachten, sowohl der vulkanischen Eruptionen als auch derjenigen Erscheinungen, welche das Erdbeben ausmachen. Das Emporsteigen von Inseln, wie auch das Emporheben ganzer Länderstrecken läßt sich mit Grund auf die Wirkung elastischer Dämpfe zurückführen. —

Dem Weltraume schreibt man gleichfalls eine eigenthümliche Temperatur zu, daß diese aber sehr gering sei, schließt man aus der beträchtlichen Erkaltung der Erdoberfläche durch die nächtliche Strahlung. Wells brachte zur Nachtzeit ein Thermometer in den Brennpunkt eines Hohlspiegels, welcher gegen den Himmel gerichtet war. Es ergab sich eine Temperaturerniedrigung von 7° bis 8° unter die Temperatur der Luft. Man kann hieraus entnehmen, daß die Erde in heiteren Nächten mehr Wärme verliert als sie erhält. Pouillet bestimmte die Gesetze der nächtlichen Strahlung durch ein Instrument, welches von ihm Actinometer genannt wurde. Es bestand aus einem horizontalliegenden Thermometer, welches durch Eiderdunen gegen jede Wärmezuleitung von unten und von der Seite her hinreichend geschützt war. Dieses Instrument brachte er während einer heitern Nacht in's Freie und verglich seine Temperaturerniedrigung mit dem Sinken der Lufttemperatur.

Nach Pouillet's Betrachtungen, denen jedoch eine sichere Grundlage mangelt, hat der Weltraum eine Temperatur von 140° unter Null.

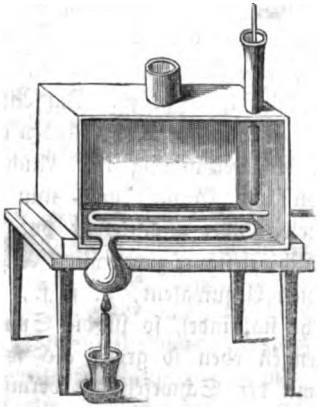
140. Nach der Sonne sind die chemischen Verbindungen die wirksamsten Mittel, um Wärme hervorzurufen. Die meisten chemischen Verbindungen sind von einer Wärmeentwickelung begleitet, wofür sich eine Menge bekannter Beispiele anführen lassen. So erhitzen sich lebendiger Kalk und englische Schwefelsäure mit Wasser; Baryt, Strontian und Kalk können durch ihre Verbindung mit der Schwefelsäure glühend werden, chlorsaures Kali entwickelt mit Schwefelsäure so viel Wärme, daß dadurch Schwefel entzündet wird, wie dies beim chemischen Feuerzeuge der Fall ist, u. s. w. Im Allgemeinen ist die Wärmemenge, welche bei chemischen Verbindungen entwickelt wird, um so größer, je inniger die Verbindung ist. Auch ist die entwickelte Wärmemenge eine constante Größe, mag nun die Verbindung schnell oder langsam, mittelbar oder unmittelbar vor sich gehen. Mischt man z. B. englische Schwefelsäure zuerst mit 1 Aequivalent Wasser, darauf mit einem zweiten Aequivalent, u. s. f., bis keine merkliche Wärmeentwickelung mehr stattfindet, so ist die Summe der allmälig freiwerdenden Wärmemengen eben so groß, als wenn man dieselbe Wassermasse auf einmal mit der Schwefelsäure vermischt

Digitized by Google

hätte. Heß hat hierüber noch viele ähnliche Verſuche angeſtellt. Nach Andrews's Unterſuchungen entwickelt 1 Aeq. verſchiedener Säuren bei ſeiner Verbindung mit derſelben Baſis faſt ganz gleiche Wärmemengen, während 1 Aeq. verſchiedener Baſen mit derſelben Säure verſchiedene Wärmemengen hervorbringt. Wenn ſich neutrale Salze mit Säuren zu ſauren Salzen verbinden, ſo findet nach Andrews keine Wärmeentwickelung ſtatt, wohl aber, wenn ſich neutrale Salze durch Aufnahme einer neuen Quantität Baſis in baſiſche Salze verwandeln.

Dagegen wird bei zuſammengeſetzten chemiſchen Proceſſen nicht immer Wärme, ſondern mitunter auch Kälte erzeugt. Es muß eine Wärmeabſorption, alſo Kälte entſtehen, wenn ſolche chemiſche Verbindungen zerlegt werden, welche bei ihrer Bildung Wärme entwickelten. Auch bei jenen Verbindungen, welche Auflöſung eines Körpers zur Folge haben, muß Wärme abſorbirt werden.

Die wichtigſte Wärmequelle iſt die Verbindung der Körper mit dem Sauerſtoff oder die Verbrennung. Um den Verbrennungsproceß einzuleiten, iſt eine beſtimmte Temperaturerhöhung nöthig, welche bei verſchiedenen Körpern ſehr ungleich iſt. Manche Körper entzünden ſich ſchon in gewöhnlicher Lufttemperatur. Einen ſolchen Selbſtzünder (Pyrophor) erhält man z. B. durch gelindes Glühen von Kalialaun und Kohlenpulver. Ueberhaupt ſind fein vertheilte Stoffe, z. B. in Kohle verwandelte Leinwand, ſehr entzündlich. Kalium brennt im Waſſer bei jeder Temperatur, Phosphor-Waſſerſtoffgas, ſobald es mit der Luft in Berührung tritt, Phosphor bei 38°, Schwefel bei 294° und Waſſerſtoffgas bei 300° C. Hat der Verbrennungsproceß einmal begonnen, ſo entwickelt er ſelbſt die zu ſeiner Fortſetzung nöthige Wärmemenge.



Um die durch den Verbrennungsproceß entwickelte Wärmemenge zu beſtimmen, kann man ſich eines ähnlichen Verfahrens bedienen, wie bei der Ermittelung der latenten Wärme der Dämpfe. Rumford gebrauchte nebenſtehendes Calorimeter. Am Boden eines kupfernen Gefäßes befindet ſich ein horizontales Schlangenrohr mit einem Trichter, unter welchen der zu verbrennende Körper gebracht wird. Den letzteren

Digitized by Google

wägt man vor und nach dem Versuche, wodurch sich die Menge des verbrannten Stoffes ergiebt. Das Gefäß ist mit Wasser gefüllt, dessen Temperatur durch ein Thermometer bestimmt wird. Um genaue Resultate zu erhalten, muß man noch die Temperatur beachten, mit welcher die gasförmigen Producte des Verbrennens aus dem Schlangenrohre hervortreten.

Aus den Versuchen, welche mit diesem Apparate angestellt worden sind, hat sich ergeben, daß man durch das Verbrennen von 1 Pfund der nachbenannten Körper so viele Pfund Wasser von 0° bis 100° erwärmen kann, als die beigesetzten Zahlen angeben.

Wasserstoffgas . . .	230	Wachs, weißes . . .	94,79
Kohlenwasserstoffgas .	62,12	Trocknes Holz . . .	36
Baumöl	112	Lufttrocknes Holz . .	29
Rüböl, gereinigt . . .	93	Holzkohlen	75
Alkohol	60	Steinkohlen bester Qualität	70
Talg	80	Coaks	66

Bei einem Apparate von Dulong geschah die Verbrennung in einer Kammer aus dünnem Kupferblech, welche sich in einem mit Wasser gefüllten Gefäße befand. Mit dem Verbrennungsraume stand das Schlangenrohr in Verbindung, dessen Ende etwas erweitert war, um ein Thermometer aufnehmen zu können. Während des Versuches wurde das Wasser vermittelst eines Rührers beständig in Bewegung erhalten.

Folgende Tafel enthält zum Theil die Resultate der Dulong'schen Versuche. Die Zahlen geben die Temperaturerhöhung an, welche durch die Verbrennung von 1 Gramm der Substanz in 1 Kilogr. Wasser hervorgebracht wird.

Namen der verbrannten Körper	Temperaturerhöhung.
Wasserstoff . . .	34,60
Sumpfgas . . .	13,35
Kohlenoxydgas . .	2,49
Oelbildendes Gas .	12,20
Absoluter Alkohol .	6,96
Kohle	7,29
Terpentinöl . . .	11,57
Schwefeläther . .	10,04
Schwefel	2,60

Digitized by Google

141. Um einen lebhaften Verbrennungsproceß zu unterhalten, ist es nöthig, daß fortwährend eine hinreichende Menge Sauerstoff zuströmt, da einmal jeder Körper eine bestimmte Menge desselben bedarf, um sich mit ihm vollständig zu verbinden, und dann auch, weil ein bedeutender Theil desselben mit dem Stickstoff der Luft unbenutzt entweicht. Die Verbrennung geht um so schneller von Statten, je vielfacher die Berührung zwischen dem Brenn- und Sauerstoff ist; daher bemerkt man im comprimirten Sauerstoffgase ein viel lebhafteres Verbrennen als in der gewöhnlichen atmosphärischen oder gar in verdünnter Luft. Die Geschwindigkeit des Luftzuges darf indessen eine gewisse Grenze nicht überschreiten, weil sonst der verbrennende Körper abgekühlt werden würde. Noch rascher und vollkommener erfolgt das Verbrennen, wenn die zuströmende Luft im Voraus erwärmt ist. Deshalb wendet man bei Hohöfen u. dgl. erhitzte Luft an. Bei einem unvollkommenen Verbrennungsprocesse entweichen viele Theilchen des Körpers, denen die zum Verbrennen nöthige Hitze abgeht, mit der Luft und dem Wasserdampfe als Rauch und bilden da, wo sie sich an kältere Körper ansetzen, den Ruß. Geht der Verbrennungsproceß gehörig von Statten, so entweichen der Kohlen- und Wasserstoff unserer gewöhnlichen Brennmaterialien als Kohlensäure und Wasserdampf, während die mineralischen Bestandtheile als Asche zurückbleiben. Die Mittel, den Verbrennungsproceß zu verlangsamen oder ganz zu unterdrücken, ergeben sich aus dem Vorstehenden von selbst. Es geschieht dies, wenn man den brennenden Körper durch kaltes Wasser abkühlt, den Zufluß des Sauerstoffes hemmt oder wenn man den Körper durch eine schickliche Bedeckung vor der Berührung mit dem Sauerstoff bewahrt. So kann man einen brennenden Körper durch Bedecken mit Mist, Sand, Häckerling auslöschen und auch die Entzündung eines Körpers dadurch verhindern, daß man ihn mit einem nicht brennbaren Stoffe überzieht. Hierauf beruht der bekannte Aldinische Sicherheitspanzer, der aus einer mit Salzsoole getränkten Kleidung aus Schaafswolle besteht, über welche noch ein Drahtnetz angezogen wird. Das Ausblasen einer Kerzenflamme beruht auf der Abkühlung der brennenden Theilchen durch den Luftstrom. Eine solche Abkühlung bewirken auch Metalle. Wenn ein Gas innerhalb eines Drahtnetzes brennt, welches etwa 400 Löcher auf den Quadratzoll hat, so verbreitet sich die Flamme nicht hindurch, weil dem auf der anderen Seite des Netzes befindlichen Gase die zum Verbrennen nöthige Wärme nicht mitgetheilt werden kann. Hierauf gründet sich Davy's Sicherheitslampe, welche

Digitized by Google

den Bergleuten an Orten, welche Knallluft enthalten, wesentliche Dienste leistet.

142. Die Körper können mit oder ohne Flamme brennen, je nachdem sie im Acte des Verbrennens gasförmige Bestandtheile entwickeln oder nicht; im letzteren Falle findet ein bloßes Glühen statt. Die Leuchtkraft eines brennenden Körpers hängt vorzugsweise von seiner Dichtigkeit ab, so daß sie mit dieser zunimmt. Deshalb verbreiten die festen und tropfbaren Körper meist ein helleres Licht als die weniger dichten Gase. Die Leuchtkraft der Gase läßt sich aber bedeutend erhöhen, wenn man in ihre Flamme einen festen Körper bringt, z. B. einen Platindraht, welcher darin bald weißglühend wird. Läßt man eine Wasserstoffflamme durch Terpentinöl streichen, so nimmt sie aus diesem eine Menge Dampftheilchen auf und verbreitet dann einen intensiven Glanz. Ein besonders starkes Licht erhält man aber, wenn man ein Stückchen Kalk in eine Knallgasflamme bringt. Die einfachste Flamme bildet Wasserstoff, wenn er sich mit Sauerstoff verbindet. Während das Gas aufsteigt, verbinden sich die äußeren Theilchen mit dem Sauerstoff, weshalb sein Umfang um so mehr abnehmen muß, je höher es steigt. Daher die zugespitzte Form der Flamme. Im inneren Theile der letzteren findet keine Verbrennung statt, man kann einen brennbaren Körper, wie Phosphor hineinbringen, ohne daß er sich entzündet. Beim Anzünden einer Wachskerze oder Oellampe wird das Wachs oder Oel zersetzt, es entstehen brennbare Gase, welche durch ihr Verbrennen eine schwach leuchtende Hülle a b c bilden. Rings um den unteren Theil des Dochtes, wo das brennende Gas noch weniger erhitzt ist, bemerkt man einen hellblauen Theil der Flamme. Den dunklen kegelförmigen Raum k umgiebt eine hellleuchtende weiße Hülle, welche von weißglühendem Kohlenstoffe herrührt; sie ist der leuchtendste Theil der Flamme. Die Flamme der Argand'schen Lampe bildet einen leuchtenden Ring, weil der Luftstrom mitten hindurchgeht.

143. Auch der Lebensproceß ist von einer fortwährenden Wärmeentwickelung begleitet. Der Mensch und die meisten Thiere haben eine Blutwärme, welche von ihrer äußeren Umgebung unabhängig ist; in welchem Klima auch der Mensch leben mag, die Temperatur seines Blutes ist fast immer constant. Diese Temperatur beträgt nahe 37°. Aus zahlreichen Beobachtungen, welche Davy über die Blutwärme der verschiedensten Thiere angestellt hat, ergiebt sich, daß

Digitized by Google

das Blut der Vögel am wärmsten ist und daß nach ihnen das der Säugethiere kommt, während bei den übrigen Thieren die Temperatur des Körpers nur wenig von der Temperatur der Umgebung verschieden ist.

Die Quelle der thierischen Wärme, wenigstens die vorzüglichste, ist der Athmungsproceß, durch welchen der Kohlen- und Wasserstoff der aufgenommenen Nahrungsmittel in Kohlensäure und Wasserdunst verwandelt wird, indem sich jene Stoffe mit dem Sauerstoff der Atmosphäre verbinden. Uebrigens werden auch durch die Hautausdünstung Kohlensäure und Wasser abgeschieden. Die Wärmemenge, welche sich auf jene Weise entwickelt, muß offenbar dieselbe sein, als wenn die genannten Stoffe in freier Luft verbrannt würden. So ist der Athmungsproceß im Wesentlichen ein Verbrennungsproceß. Durch die Nahrungsmittel wird dem Körper weiter ersetzt, was er durch jenen Proceß an Kohlen- und Wasserstoff verliert. Nach Liebig ist hierzu diejenige Nahrung vorzugsweise geschickt, welche aus Mangel an Stickstoff kein Fleisch zu bilden vermag, dagegen viel Kohlen- und Wasserstoff enthält, wie Zucker, Gummi, Amylon, Fett, Weingeist u. s. w. In kalter Luft ist natürlich der Wärmeverlust größer als in warmer, wogegen in jener eine größere Menge Sauerstoff aufgenommen wird als in letzterer; deshalb muß in einer kalten Umgebung auch mehr Wärme erzeugt werden, sofern dem Körper eine freie Bewegung gestattet ist. Auf diese Weise erhält sich das Blut auf einer constanten Temperatur, welche von derjenigen der Luft unabhängig ist. Weil aber die Wärmeerzeugung nur durch die Verbindung des Sauerstoffes mit dem Kohlen- und Wasserstoff der Nahrungsmittel stattfindet, so sieht man auch, daß dem Körper bei kalter Witterung mehr Nahrung zugeführt werden muß, wenn jener Zweck erreicht werden soll. Darum muß auch der Bewohner der kalten Zone mehr Speise zu sich nehmen als der Bewohner der heißen Zone. Eben daraus ergiebt sich, daß Bewegung und sonstige körperliche Anstrengungen, welche mit einem lebhafteren Stoffwechsel und einer größeren Wärmeentwickelung verbunden sind, einen stärkeren Hunger herbeiführen müssen.

Um die Wärmemenge zu bestimmen, welche ein Thier in einer gegebenen Zeit entwickelt, wandte Dulong ein Calorimeter an, d. h. ein Gefäß aus dünnem Kupferblech, welches in eine ziemlich große Wassermasse gesenkt wurde. In dieses Gefäß brachte er das Thier und bestimmte die von demselben entwickelte Wärme aus der Temperaturerhöhung des Wassers. Die zum Athmen erforderliche Luft

Digitized by Google

wurde aus einem Gasometer in das Gefäß geleitet. Als nach Beendigung des Versuches die Producte des Athmens analysirt wurden, ergab sich, daß ein Theil des Sauerstoffs verschwunden und daß ein anderer Theil durch Kohlensäure ersetzt war. Aus der Menge der vorhandenen Kohlensäure und der verschwundenen Sauerstoffmenge wurde nun die Wärme berechnet, welche durch den Athmungsproceß in der gegebenen Zeit erzeugt worden war. Diese Rechnung lieferte aber als Resultat nur $^8/_{10}$ — $^9/_{10}$ der Wärme, welche das Thier an das Wasser wirklich abgegeben hatte. Nach Liebig rührt diese Differenz daher, daß das Thier wegen Mangel an freier Bewegung nicht im Stande war, den Proceß des Athmens so zu beschleunigen, wie es bei der kalten Umgebung erforderlich gewesen wäre, um nicht zu frieren.

144. Auf mechanischem Wege bringen Druck, Stoß und Reibung eine Temperaturerhöhung hervor, welche mitunter sehr bedeutend ist. So kann man Eisen bekanntlich durch Hämmern bis zum Glühen erhitzen und auch die Münzen werden beim Prägen nicht unbeträchtlich erwärmt. Man hat bemerkt, daß die ersten Schläge oder Stöße die meiste Wärmeentwickelung zur Folge haben. Beim Feuerschlagen werden die durch den Stoß gegen den harten Stein loßgerissenen Stahlstückchen so erwärmt, daß sie in der Luft verbrennen. Wenn man Gase, z. B. Luft, bis etwa auf ein Fünftheil ihres Volumens zusammenpreßt, so findet eine solche Wärmeentwickelung statt, daß ein Stück Schwamm sogleich entzündet wird. Durch Druck und Stoß wird die Dichte der Körper vermehrt, ihre Wärmecapacität vermindert und daher ein Theil ihrer specifischen Wärme in Freiheit gesetzt. Darum werden auch tropfbare Flüssigkeiten, welche nur in sehr geringem Maße comprimirbar sind, durch Druck und Stoß nicht merklich erwärmt. Ueber die Wärmeentwickelung, welche bei der Verdichtung der Gase durch feste Körper stattfindet, haben wir schon früher ein Beispiel angeführt. Auch bei der Absorption von Flüssigkeiten durch feste Körper wird häufig Wärme frei. Wahrscheinlich ist, daß die geringste Formveränderung der Körper von einer Wärmeentwickelung begleitet ist. Nach Pouillet werden alle feste Körper, namentlich organische, durch Benetzung mit verschiedenen Flüssigkeiten erwärmt. Wie aber die Verdichtung eines Körpers Wärmeentwickelung zur Folge hat, so ist umgekehrt die Verdünnung desselben mit einer Abkühlung der Umgebung verbunden. Darüber läßt sich ein sehr einfacher, bekannter Versuch anstellen. Legt man nämlich ein dünnes Stückchen Kautschuck auf die Lippen und vermindert durch einen ra-

Digitized by Google

schen Zug seine Dichtigkeit, so macht sich die dadurch entstehende Abkühlung bemerklich. Wenn man ferner Luft in einem Gefäße stark zusammenpreßt, und nachdem sie sich abgekühlt hat, durch ein feines Rohr entweichen läßt, so erkaltet das letztere an der Oeffnung so bedeutend, daß daran hängende Wassertropfen gefrieren.

Daß durch Reibung Wärme entwickelt wird, bezeugen unzählige Thatsachen. So werden Bohrer, Sägen und andere derartige Werkzeuge bei ihrem Gebrauche durch's Reiben erhitzt, stark aneinander geriebene Holzstücke können sich entzünden, wie man dies mitunter an ungeschmierten Wagenaren erfährt, und selbst Eisstücke werden, wenn man sie aneinander reibt, geschmolzen. Die Wärmeentwickelung durch's Reiben wächst mit der Kraft, durch welche die Körper aneinander gedrückt werden, scheint aber von der Wärmeleitung und Capacität der Körper ganz unabhängig zu sein, so daß sie sich auf keinen Fall allein auf eine Veränderung der Wärmecapacität zurückführen läßt.

Siebentes Kapitel.

Von der Theorie der Wärmeerscheinungen.

145. Wenn man sich die bisher beschriebenen Wirkungen der Wärme vergegenwärtigt, namentlich die Ausdehnung der Körper durch die Wärme, die Processe der Schmelzung und Verdampfung, so bemerkt man wohl, daß die Wärme eine der mächtigsten und verbreitetsten Naturkräfte sein muß, daß sie vorzugsweise ein Gegner der Cohäsion ist, indem sie überall strebt, die Massentheilchen der Materie von einander zu trennen und im Raume zu zerstreuen. Die Elasticität der Gase und Dämpfe, welche ihren Grund in der Repulsion zwischen den einzelnen Theilchen derselben hat, ist ein Werk der Wärme; wie mächtig diese Wirkung ist, zeigt die Erfahrung zur Genüge an unzähligen Beispielen. Wir haben auch schon bemerkt, daß die Erscheinungen des Lichts nichts Aehnliches darbieten, und daß selbst die chemischen Processe, welche das Licht bewirkt, nicht ganz und gar auf seine Rechnung kommen. So wenig aber als die Sonne oder irgend ein anderer Körper an uns für sich das Licht erzeugen kann, eben so wenig können sie uns ohne Vermittelung eines anderen das gewähren, was wir Wärme nennen. Wenn wir sehen, wie ein Körper durch die Wärme ausgedehnt wird, wenn wir weiter beobachten, daß der Körper seine bisherige Aggregatform verliert und eine

Digitized by Google

davon ganz verschiedene erhält, so müssen wir nothwendig annehmen, daß etwas von den Massentheilchen Verschiedenes und Selbstständiges in den Zusammenhang derselben eingreift. Auch der Wärme müssen besondere Elemente zu Grunde liegen, welche durch ihr Zusammentreffen mit den Molecülen der Materie die betreffenden Erscheinungen hervorbringen. Diese Elemente kann man unter dem Namen des Wärmeäthers oder des Wärmestoffes zusammenfassen, worunter man sich aber keine cohärente Materie denken darf, die in der Regel schon eine Verbindung ungleichartiger Massentheilchen ist. Da die Wärme den Thatsachen zufolge eine ungleich stärkere Naturgewalt als das Licht ist, so unterscheiden wir den Wärmeäther von dem Lichtäther und sehen den Unterschied darin, daß zwischen dem ersteren und der Materie eine weit stärkere Anziehung besteht als zwischen der Materie und den Elementen des Lichtäthers. Wegen der allgemein verbreiteten Wirksamkeit der Wärme mag übrigens auch hier die Anziehung ungleich sein, d. h. dergestalt beschaffen, daß ein einziges Element oder Molecül der Materie eine sehr große Anzahl jener Elemente mit sich vereinigen kann. Es fallen also diese Elemente mit denjenigen zusammen, welche einen starken und sehr ungleichen Gegensatz gegen die Materie bilden und welche wir schon bei unseren früheren Betrachtungen über die Imponderabilien von anderen unterschieden haben.

Denken wir uns nun wieder ein Massentheilchen der Materie, so wird es von jenen Elementen vermöge gegenseitiger Anziehung rings eingehüllt oder von denselben in der Form einer Sphäre umgeben werden. Um diese Sphäre kann sich durch mittelbare Anziehung eine zweite, um diese eine dritte u. s. f. bilden. Während aber die äußeren Sphären nach innen drängen, wird die Dichtigkeit der inneren Sphären vermehrt und in Folge dessen Repulsion erzeugt, so daß das Molecül oder irgend eine seiner inneren, dichteren Sphären ausstrahlend wirkt, mit einer Geschwindigkeit, welche dem Drucke von allen Seiten entspricht. Ist nun der umgebende Raum erfüllt von diesen Elementen, so werden sich beständig neue Sphären von außen anschließen, während innen die Repulsion und daher auch die Ausstrahlung fortdauert. Hier kann es kein absolutes, sondern nur ein bewegliches Gleichgewicht geben, welches vorhanden ist, sobald in jedem Moment eben so viel Elemente ausgesendet werden, als von außen eindringen. Auf die Art und Weise aber, wie sich dieses Gleichgewicht herstellt, muß die Umgebung von Einfluß sein. Die Temperatur steigt, wenn der Wärmeäther aus irgend einem Grunde um das Massentheilchen angehäuft wird, wodurch die äußeren Sphä-

Digitized by Google

ren mit größerer Energie nach innen drängen; die Temperatur sinkt, wenn irgend ein Umstand bewirkt, daß die Strahlung von innen nicht mehr dem Drucke der äußeren Sphären proportional ist, wenn also in einer gegebenen Zeit mehr Elemente nach außen getrieben werden, als deren gleichzeitig eindringen können. Ebenso ist es bei einer größeren Masse. In einer solchen wird natürlich die Repulsion einen höheren Grad der Wirksamkeit erreichen, da sich um jedes Molecül, ja um jedes Element derselben Sphären bilden müssen. Der Cohäsion wird dadurch je nach der Beschaffenheit des Körpers mehr oder weniger entgegengewirkt, der letztere wird innerlich gespannt und zu einem größeren Volumen ausgedehnt.

Zwischen den Elementen des Wärmeäthers besteht keine ursprüngliche Repulsionskraft, sondern diese entsteht erst, wenn sich die Elemente mit den Massentheilchen der Materie verbinden, wenn sie mit der Constitution der letzteren in Conflict gerathen. So gehen auch die Wärmestrahlen frei durch den Brennpunkt einer Sammellinse, ohne die Erscheinung einer merklichen Abstoßung darzubieten, bringt man aber in den Brennpunkt einen festen Körper, so erhitzt sich derselbe und die Elemente der Wärme werden nach allen Richtungen zerstreut.

Wenn die Ausstrahlung der Wärme auf einer wirklichen Zerstreuung der entsprechenden Elemente beruht, so muß sich jedes Element dem Antriebe der Repulsion gemäß in einer geraden Linie fortbewegen, weil außer der Repulsion keine Kraft vorhanden ist, welche eine Bewegung in krummer Bahn bewirken könnte, falls nicht die Materie, durch welche sich die Elemente bewegen, eine Ablenkung von der anfänglichen Richtung hervorbringt. In unserem gewöhnlichen Erfahrungskreise zeigt sich allerdings keine Flüssigkeit, deren Theilchen strahlend in gerader Richtung fortschreiten, aber bei diesen ist außer der eigentlichen bewegenden Kraft noch die Schwere vorhanden, welche fortwährend eine Ablenkung von der geraden Linie bewirkt. Auch ist es nichts Anderes als jene Repulsion, was die Wärmeelemente durch den leeren Raum fortpflanzt.

146. Ein Körper wird für unsere Elemente eine um so größere Capacität haben, je dichtere und feinere Sphären sie um die Massentheilchen desselben bilden können. Die Dichtigkeit der Sphären hängt zunächst ab von der Stärke und Ungleichheit der Anziehung zwischen den Elementen des Aethers und den Molecülen der Materie, die Freiheit der Sphärenbildung aber von der Dichtigkeit des Körpers selbst. Je mehr Massentheilchen sich nämlich in einem gegebenen Volumen be-

Digitized by Google

finden, desto mehr Mittelpunkte sind vorhanden, um welche sich Sphären bilden können. Je gedrängter aber die Molecüle in einander liegen, je dichter also der Körper ist, desto weniger Freiheit haben die Elemente, sich als äußere Sphären den inneren, den Molecülen zunächst liegenden Hüllen anzuschließen. Faßt man diese beiden Umstände zusammen, so ergiebt sich, daß bei dünnen Körpern mehr Wärmeäther um die Molecüle derselben angehäuft wird, während bei den dichteren der Zusammenhang zwischen den Elementen und Molecülen inniger ist. Je gleichförmiger daher ein Körper den Raum erfüllt, desto weniger äußere Sphären können sich um die Molecüle bilden, desto geringer ist die Capacität, z. B. bei gehämmerten Metallen. Hierin liegt der Grund für die Verschiedenheit der Wärmecapacität, der Absorption und Wärmeleitung. So wird ein dichter Körper, z. B. ein Metall, eben weil die Anzahl seiner Massentheilchen im gegebenen Volumen größer ist, mehr Punkte besitzen, von denen die Repulsion ausgehen kann, er wird deshalb auch die Wärme mit größerer Energie durch sein Inneres leiten als ein weniger dichter Körper. Dagegen wird der letztere mehr Wärme absorbiren, womit die Ausstrahlung an der Oberfläche in directem Verhältnisse steht, sobald das Gleichgewicht in den Sphären einmal gestört ist. Uebrigens muß die Größe der Absorption auch von der Wärmequelle selbst abhängen. Im Allgemeinen werden die Wärmequellen niedrigerer Temperatur eine größere Anzahl absorbirbarer Elemente liefern; je größer aber die Energie ist, mit welcher die Wärmequelle die Elemente aussendet, desto eher werden sie der Absorption widerstehen können. Die eben erwähnten Erscheinungen werden also unter sonst gleichen Umständen namentlich bedingt durch die Dichtigkeit der Körper und durch die Art und Weise, wie die Materie den Raum erfüllt. Mit der Vermehrung der Dichtigkeit eines Körpers muß nothwendiger Weise eine Verminderung der Capacität und daher eine Wärmeentwickelung verbunden sein.

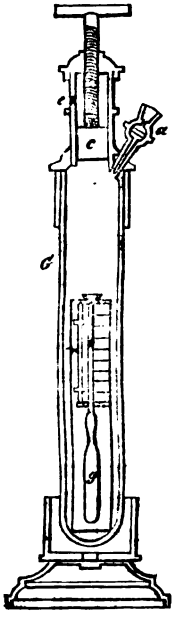
In einem System von Körpern empfängt jeder von dem anderen Wärmestrahlen, während er solche jedem zusendet. Gleichgewicht der Temperatur findet statt, sobald jeder eben so viel Wärme erhält als er ausstrahlt, mag auch die Capacität dieser Körper noch so ungleich und die Geschwindigkeit des Wechsels in ihnen verschieden sein. Denn im Grunde strebt jeder Körper, in Beziehung auf die Wärme, nur mit sich selbst in's Gleichgewicht zu kommen.

147. Dehnt sich ein Körper durch Einwirkung der Wärme aus, so muß seine Capacität zunehmen. Denn je weiter die Mole-

Digitized by Google

cüle der Körper auseinander treten, desto leichter wird es den Elementen, welche den Erscheinungen der Wärme zu Grunde liegen, sich sphärenartig um die Molecüle zu gruppiren. Je weiter aber die Sphärenbildung fortschreitet, desto mehr nimmt der Zusammenhang zwischen den Molecülen des Körpers oder die Cohäsion desselben ab, desto mehr nähert sich der Körper seinem Schmelzpunkte. Sobald der Körper einmal in den Zustand des Schmelzens gerathen ist, vermindert sich die Repulsion zwischen den Elementen des Wärmeäthers bedeutend, der Körper ist nun weniger fähig, dieselben als fühlbare Wärme nach Außen zu senden, sie schließen sich (als latente Wärme) den schon vorhandenen Sphären inniger an und vervollständigen so den Proceß des Schmelzens. Es ist wahrscheinlich, daß die Molecüle der Körper während der tropfbarflüssigen Form nur noch vermittelst jener Sphären in Verbindung stehen, welche jetzt ihre größte chemische Gewalt ausüben. Die letztere scheint für Wasser bei 4° C., also bei dem Punkte seiner größten Dichtigkeit, am stärksten zu sein. Wenn die Temperatur des Wassers unter diesen Punkt sinkt oder über denselben steigt, so dehnt es sich wieder aus, weil im ersten Falle die chemische Gewalt der Sphären vermindert, im zweiten aber deren Repulsion verstärkt wird. Da aber der Wärmeäther, welcher im beständigen Wechsel des Aus- und Einströmens begriffen ist, keine feste Configuration mit den Molecülen eingehen kann, so erhalten die letzteren freie Beweglichkeit. In diesem Zustande pflanzt die Masse jeden auf ihrer Oberfläche angebrachten Druck nach allen Richtungen gleichmäßig fort; hierin sowohl als auch in dem Umstande, daß die gebundene Wärmemenge, welche den tropfbarflüssigen Zustand bedingt, herausgepreßt werden müßte, wenn eine Verdichtung erfolgen sollte, mag die Gewalt liegen, womit tropfbare Körper sich jeder Compression widersetzen. Daß aber auch derartige Flüssigkeiten bis zu einem gewissen Grade zusammengedrückt werden können, haben Versuche außer allen Zweifel gestellt. Oersted gebrauchte den folgenden Apparat, um die Zusammendrückbarkeit tropfbarer Körper zu messen. G ist das sogenannte Compressionsgefäß, welches aus dickem Glase verfertigt ist. Innerhalb desselben sieht man ein Gefäß g, welches in ein Haarröhrchen ausläuft, das oben einen kleinen Trichter trägt. Die Röhre ist genau graduirt, in der Art, daß das Volumen zwischen je zwei Theilstrichen ein bekannter Bruchtheil vom Inhalte des Gefäßes g ist. Dieses Instrument, das sogenannte Piezometer, füllt man mit der zu prüfenden Flüssigkeit und sperrt diese durch ein kleines Säulchen von Luft, von Queckſilber

Digitized by Google



oder Schwefelkohlenstoff ab. Alsdann bringt man es unter Vermeidung der geringsten Temperaturerhöhung in das Gefäß G, welches zuvor mit Wasser gefüllt wurde. An dem oberen Theile des letzterwähnten Gefäßes befindet sich eine metallene Röhre, in welcher sich ein Kolben c bewegen kann. Wenn das Gefäß G durch den Hahn a mit Wasser gefüllt wird, steht der Kolben oberhalb der Oeffnung o, damit durch diese die Luft entweicht. Darauf wird a geschlossen und der Kolben c durch Umdrehung der Handhabe hinabgedrückt. Auf diese Weise wird auf das Wasser im Gefäße G ein Druck ausgeübt, welcher sich auf die Flüssigkeit im Piezometer g fortpflanzt. Die Größe des angewandten Druckes erfährt man durch ein kleines Luftmanometer, welches aus einer cylindrischen, unten offenen und oben geschlossenen Glasröhre r besteht. Die Raumverminderung der betreffenden Flüssigkeit dagegen ergiebt sich aus der Stellung des Index in dem Röhrchen des Piezometers. Da aber auch das Glas etwas zusammendrückbar ist, so ist an den Beobachtungen noch eine Correction anzubringen. Nach den Versuchen von Colladon und Sturm wird der cubische Inhalt eines Glasgefäßes durch den Druck einer Atmosphäre um 0,00000165 seines ursprünglichen Volumens zusammengedrückt. Durch diese Zahl sind also die mit dem obigen Instrumente erhaltenen Resultate zu corrigiren. Man fand so, daß luftfreies Wasser durch den Druck einer Atmosphäre um 49 Milliontel seines Volumens zusammengepreßt wird. Schwefeläther zeigte bei 11° eine weit größere Zusammendrückbarkeit als bei 0° und wahrscheinlich sind fast alle Flüssigkeiten bei höherer Temperatur zusammendrückbarer als bei niedrigerer, worüber Versuche bald entscheiden werden.

148. Die tropfbarflüssige Form der Körper ist den Thatsachen zufolge keine selbstständige, sie besteht nicht ohne äußeren Druck und ist immer im Begriff überzugehen in die Form des Dampfes. Der äußere Druck, unter welchem die Flüssigkeiten gewöhnlich stehen, hindert die Wärmeelemente noch, Sphäre um Sphäre zu bilden oder die Molecüle dergestalt einzuhüllen, daß sie völlig isolirt werden. Kann indessen eine Wärmequelle hinreichend auf eine tropfbare Flüssigkeit einwirken, so schließen sich fortwährend neue Sphären den

Digitized by Google

ſchon vorhandenen an, wodurch die Molecüle endlich völlig von einander getrennt werden, und an die Stelle der vorigen Cohäſion tritt Repulſion aller Theilchen, welche ſich in der Maſſe unterſcheiden laſſen. Sofern es nun an freien Elementen nicht fehlt, werden ſich die Hüllen der iſolirten Molecüle fortwährend vergrößern und mit ihnen das Volumen der Dämpfe oder Gaſe. Je größer der Gegenſatz zwiſchen den Grundbeſtandtheilen eines Gaſes und den Elementen des Wärmeäthers iſt, deſto mehr wird das Gas von den letzteren aufnehmen, deſto dünner und leichter iſt es und um ſo größer iſt ſeine ſpecifiſche Expanſivkraft. So hat der Waſſerſtoff eine beinahe 14 Mal größere Spannkraft als die atmoſphäriſche Luft, während dieſe bei gleicher Temperatur 14 Mal dichter als jener iſt. Die ſpecifiſchen Elaſticitäten zweier Gaſe verhalten ſich überhaupt, wie bekannt iſt, umgekehrt wie ihre Dichtigkeiten, wenn ſie gleicher Temperatur und demſelben Drucke ausgeſetzt ſind.

Wird aber das Volumen eines Gaſes durch Zuſammendrückung vermindert, alſo ſeine Dichtigkeit vermehrt, ſo werden die Sphären der einzelnen Gastheilchen in einander gedrängt, wodurch die Repulſion zwiſchen denſelben wächſt und mit ihr die Spannkraft des Gaſes. Zugleich ſteigt die Temperatur des Gaſes, indem von den Hüllen ein Theil als freie Wärme entweicht. Die Summe aller Spannkräfte bleibt im Grunde die nämliche, nur in einem engeren Raume vereinigt, während die Repulſion vorzugsweiſe zwiſchen den näheren, dichteren Hüllen der einzelnen Atome ſtattfindet. Sobald das comprimirte Gas Gelegenheit erhält, ſich wieder auszudehnen, ſuchen ſich auch die Sphären wieder zu vergrößern, wodurch eine Erkaltung der Umgebung herbeigeführt wird.

Kommen ungleichartige Gaſe mit einander in Berührung, ſo müſſen ſie ſich gleichförmig in einander vertheilen, weil jedes der eigenthümlichen, zwiſchen ſeinen einzelnen Theilchen beſtehenden Spannkraft folgt.

Man weiß, daß ungleichartige Gaſe (z. B. Sauer- und Waſſerſtoff), deren Grundbeſtandtheile eine chemiſche Verbindung mit einander eingehen können, doch nicht auf einander einwirken, wenn man ſie auch in einem Gefäße einer ſtarken Compreſſion ausſetzt. Ein Hinderniß iſt alſo vorhanden, welches der chemiſchen Affinität nicht erlaubt, ihre gewohnte Wirkung zu äußern; dieſes Hinderniß hat mit der Gasform einerlei Grund. Nach dem Obigen ſind die Elemente der Gaſe mit mehr oder weniger großen Sphären von Wärmeelementen eingehüllt und dadurch iſolirt. Dieſe Sphären ſind größtentheils un-

Digitized by Google

durchdringlich für einander und daher auch die Atome, welche von ihnen umgeben werden, völlig für einander verschlossen. Schlägt aber ein elektrischer Funke durch's Gasgemenge, so werden die Sphären großentheils zerstört und die Atome wieder für einander aufgeschlossen.

Im §. 111 haben wir gesehen, daß die Dämpfe aller Flüssigkeiten und selbst Gase, welche man früher zu den permanenten rechnete, tropfbar gemacht werden können. Die Grundbestandtheile dieser Dämpfe sind nichts Anderes als die aus ungleichartigen Elementen zusammengesetzten Molecüle oder Massentheilchen der tropfbaren oder starren Körper, welche durch die Sphären des Wärmeäthers von einander getrennt wurden. Die in jenem §. angegebenen Mittel bewirken, daß die Anziehung zwischen diesen Massentheilchen wieder die Oberhand gewinnt. Sind nun die Grundbestandtheile eines Gases, z. B. des Sauerstoffes, nicht solche Massentheilchen, sondern vielmehr einfache Elemente oder Atome, welche unter sich völlig gleichartig sind und keine chemische Verbindung vermöge gegenseitiger Anziehung eingehen können, so ist es auch unmöglich, sie durch Druck und Erkaltung tropfbarflüssig zu machen. Denn der tropfbare Körper erfordert eben so wohl eine gewisse Anziehung zwischen den ihn bildenden Bestandtheilen, wie der starre. So sind auch die Gase, welche man auf die bekannte Weise tropfbarflüssig gemacht hat, z. B. Cyan, Ammoniak, Stickstoffoxydul, Schwefelwasserstoff, Kohlensäure, fast durchweg chemisch zusammengesetzter Natur.

Wenn ein Gas in einem porösen Körper verdichtet wird, so muß von den äußeren Hüllen während der Absorption etwas abgestreift werden, was als freie Wärme entweicht. Hierbei kommt viel auf die Größe der Poren, also auf das Verhältniß an, in welchem die Größe der Hüllen zur Größe der Poren steht. Die Verdichtung des Gases wird unter sonst gleichen Umständen um so geringer sein, je dünner das Gas ist, je größer also seine Wärmehüllen und seine specifische Expansivkraft sind. Uebrigens muß in einer dünnen Atmosphäre, wo die Hüllen zahlreicher über einander liegen, dem Volumen nach mehr, dem Gewichte nach aber weniger Gas eindringen, weil der äußere Druck schwächer ist.

149. Wenn die Bestandtheile der Körper durch Reiben in ihrer gegenseitigen Lage gestört werden, so können die Wärmesphären unmöglich in Ruhe bleiben, sondern ihre Elemente müssen in Repulsion versetzt werden, und zwar um so mehr, je größer die Aufregung der Körpertheilchen ist. Daher muß die entwickelte Wärmemenge mit

Digitized by Google

der Kraft wachsen, durch welche die Körper während des Reibens an einander gedrückt werden. Aehnliches findet statt, wenn die Massentheilchen ungleichartiger Stoffe plötzlich eine chemische Verbindung mit einander eingehen; wir wissen dann, daß jene nicht eher ruhen können, als bis zwischen ihnen Gleichgewicht der Attraction und Repulsion eingetreten ist. Daher kann auch der Wärmeäther keine bleibende Verbindung mit den oscillirenden Bestandtheilen der neu entstehenden Materie eingehen, sondern er muß mit mehr oder weniger Heftigkeit eine Zeit lang fortgetrieben werden. Die Wärmeentwickelung durch Reiben ist in der That unbegrenzt; denn während die Massentheilchen der Körper oder deren innere, dichtere Sphären die Aetherelemente nach außen senden, drängen die äußeren Sphären nach innen, so daß die Sphärenbildung in demselben Momente zerstört und erneuert wird. Dies geht auf dieselbe Weise so lange fort, als die Aufregung der Körpertheilchen dauert. Die Wärmecapacität der Körper ist nach dem Reiben dieselbe wie vorher, sofern durch's Reiben keine bleibende Aenderung der Dichtigkeit herbeigeführt wird.

150. Man hat Beispiele von festen Körpern, welche je nach der Temperatur, bei der sie erstarren, beträchtliche Unterschiede hinsichtlich der Gestaltung zeigen. So krystallisirt kohlensaurer Kalk (Kalkspath) in Rhomboedern, sechsseitigen Pyramiden, sechsseitigen Säulen, in Gestalten, die sich alle von einem Rhomboeder ableiten lassen, aber auch als Arragonit in Prismen, denen keine rhomboedrische Grundgestalt zukommt. Erhitzt man den Arragonit, so zerspringt er in lauter rhomboedrische Krystalle. Eine Auflösung von Schwefel in Schwefelkohlenstoff bildet rhombische Octaeder, dagegen schießt geschmolzener Schwefel beim langsamen Erkalten in schiefen rhombischen Säulen an, die anfänglich ganz durchsichtig sind, aber, einige Tage bei gewöhnlicher Temperatur aufbewahrt, undurchsichtig werden. Selensaures Zinkoxyd krystallisirt unter 15° in geraden rhombischen Säulen, welche, eine Zeit lang dem Sonnenlichte ausgesetzt in eine Menge von Quadratoctaedern zerfallen. Die bei einer gewissen Temperatur erzeugten Krystalle können also bei veränderter Temperatur in ein Aggregat von Krystallen eines anderen Systemes übergehen. Man hat mit Grund angeführt, daß die Verschiedenheit der Gestaltung von einer Ungleichheit der gebundenen Wärmemenge herrühre, wenigstens ist ein Einfluß der Wärme auf diese Erscheinungen gar nicht zu verkennen. Weil nach unserer Ansicht zwischen dem Wärmeäther und der Materie eine stärkere Anziehung besteht als zwischen ihr und dem Lichtäther, so ist auch der erstere eher im Stande, auf die Ge-

Digitized by Google

staltung der Molecüle einzuwirken, als der letztere, welcher sich vielmehr so um die Molecüle gruppiren muß, wie es deren eigene Anordnung verlangt.

151. Die Analogie, welche zwischen manchen Licht- und Wärmeerscheinungen besteht, hat in verschiedenen Physikern die Vermuthung erregt, daß auch die Wärme durch eine undulirende Bewegung hervorgebracht werde. Aus dem Früheren wissen wir, daß die Wärme gleich dem Lichte reflectirt, gebrochen, polarisirt u. s. w. wird, worauf gerade die Analogie zwischen beiden beruht. Jene Physiker nehmen nun an, daß die Wärme ihren Grund in den Vibrationen der Atome und der sie einhüllenden Aetherelemente habe. Diese Vibrationen können sich fortpflanzen wie jene des Schalles und Lichtes, indem sie die einmal berührten Theilchen des Aethers in völliger Ruhe zurücklassen. Auf diese Weise geht nach Ampère die Wärmestrahlung vor sich, während die Wärmeleitung darauf beruht, daß sich vermittelst des Aethers den Atomen der Körper selbst Schwingungen mittheilen, welche dann die Wärme wieder strahlend fortpflanzen können. Die Vibrationen des Aethers, welche der Wärme zu Grunde liegen, sollen sich von denen des Lichtes durch eine größere Wellenlänge und zufolge dessen durch eine geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit unterscheiden. Die längeren Wellen werden vom Wasser und von schwachen Salzlösungen nicht durchgelassen, falls die flüssige Schicht nur einige Millimeter dick ist. Da nun das Auge mit Wasser angefüllt ist, so können wir eine dunkle Wärmequelle nicht eher wahrnehmen, als bis die Wellen eine geringere Länge erreicht haben. Die Wärmemenge eines Körpers ist nach dieser Theorie nichts Anderes als die lebendige Kraft seiner schwingenden Theile. Die Temperatur steigt oder sinkt, je nachdem diese Kraft zu- oder abnimmt, während durch eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Schwingungsbahnen Wärme frei oder gebunden wird. Aus einer Zunahme der Schwingungsweite, womit die Temperatur wächst, sucht man nun auch die Ausdehnung der Körper durch die Wärme zu erklären.

Indessen können Licht und Wärme nicht wohl von denselben Schwingungen des Aethers herrühren. Wir haben schon früher bemerkt, daß, wenn man das Spectrum des Sonnenlichtes durch ein Steinsalzprisma entstehen läßt, die Wärme von dem Violet gegen das Roth hin allmälig zunimmt und daß das Maximum ihrer Intensität sogar noch merklich jenseits der am wenigsten brechbaren rothen Strahlen liegt. Schon dies deutet an, daß die Wärme vom Lichte verschieden sei, wenn auch beide meist in Gemeinschaft mit einander auf-

Digitized by Google

treten. Wir wissen ferner, daß die Brechbarkeit der Lichtstrahlen von der rothen gegen die violete Farbe hin zunimmt und daß der Grund der stärkeren Brechbarkeit der violeten Strahlen in ihrer geringeren Wellenlänge liegt. Nun ist aber schlechterdings nicht einzusehen, wie die Wärmestrahlen im violeten Theile des Spectrums gleiche Brechbarkeit mit den violeten Strahlen haben können, wenn sie sich von diesen durch eine ungleiche Wellenlänge unterscheiden sollen. Bringt man zwischen das Prisma und das einfallende Lichtbündel farbige Gläser, so erleidet die Lichtintensität unregelmäßige Veränderungen, während die Wärme immer noch gleichmäßig vom Violet bis zum Roth hin zunimmt. Endlich spricht sich auch in der Trennung des Lichts von der Wärme eine Verschiedenheit beider deutlich genug aus. Man wird hierdurch nothwendig auf die Vermuthung geführt, daß der Aether überhaupt verschiedene Arten von Elementen enthält, welche sich durch ihre verschiedene Anziehung zu den Molecülen der Materie von einander unterscheiden. Dies gewinnt an Wahrscheinlichkeit, wenn man sich an solche Erscheinungen der Wärme erinnert, für welche die Lehre vom Lichte keine Analogien darbietet, namentlich an die Ausdehnung der Körper durch die Wärme, an die Processe der Schmelzung und Verdampfung u. s. w. Gestützt auf die Erscheinungen selbst können wir annehmen, daß die Elemente des Aethers, welche der Wärme zu Grunde liegen, von den anderen Elementen, deren Schwingungen das Licht hervorbringen, dadurch unterschieden sind, daß die Anziehung zwischen ihnen und den Molecülen der Materie stärker ist, zu welcher Annahme wir uns schon früher veranlaßt sahen. Wir haben auch schon Seite 226 bemerkt, daß die Repulsion, welche auf die Verdichtung der Wärmeelemente (durch Anziehung) folgt, entweder eine wirkliche Zerstreuung der Elemente oder eine bloße Oscillation derselben vom Molecül aus herbeiführen muß. Ob das Eine oder Andere wahrscheinlicher ist, kann nur die fortgesetzte Untersuchung entscheiden; durch diese muß offenbar werden, ob die eine oder andere Annahme den einfachsten und fruchtbarsten Erklärungsgrund der Erscheinungen darbietet. Eine Oscillation kann im Grunde nur da vorkommen, wo ein regelmäßiger Wechsel zwischen Attraction und Repulsion stattfindet, wobei die letztere eine gewisse Grenze nicht überschreiten darf, damit die Elemente nicht ganz aus dem Bereiche der Anziehung heraustreten; denn in einem solchen Falle müßte gewiß eine Zerstreuung der Elemente erfolgen. Der erwähnte regelmäßige Wechsel ist zu erwarten beim Lichtäther, in so fern man sich unter diesem solche Elemente denkt, welche gegen die

Digitized by Google

Massentheilchen der Materie nur einen schwachen und ungleichen Gegensatz bilden.

Aus einer vergleichenden Betrachtung zwischen den Wärme- und Lichterscheinungen glauben wir schließen zu können, daß sowohl jenen als auch diesen eine besondere Aetherart zu Grunde liege, selbst dann, wenn man die Wärme auf eine schwingende Bewegung zurückführen will. Uebrigens hat man durchaus keine Ursache, beide Aetherarten als absolut gegen einander abgeschlossen zu betrachten; wahrscheinlicher ist, daß beide Arten allmälig in einander übergehen, d. h. daß zwischen beiden Elemente liegen, welche sich auf der einen Seite mehr dem Lichtäther, auf der anderen Seite mehr dem Wärmeäther nähern, wie dies auch schon aus dem Unterscheidungsmerkmale folgt, das wir zwischen ihnen festgestellt haben. Es ist sogar noch fraglich, ob die Elemente, aus deren Schwingungen man die Lichterscheinungen erklärt, unter sich durchaus gleichartig sind. Bekanntlich besteht das weiße Licht aus verschiedenfarbigen Strahlen, welche sich nach der Vibrationstheorie des Lichts durch ihre ungleiche Wellenlänge von einander unterscheiden sollen. Haben nun diese Unterschiede ihren Grund in der Materie, oder ist es nicht vielmehr wahrscheinlich, daß die verschiedene Schwingungsweise jener Strahlenarten von einer wirklichen Verschiedenheit der Aetherelemente herrühre, welche die Massentheilchen der Materie umgeben, zumal wenn man bedenkt, daß jedes Massentheilchen eines Körpers das weiße Licht, also auch dessen verschiedenfarbige Bestandtheile, nach allen Richtungen verbreitet? Es fragt sich sehr, ob ein Aether, dessen Theilchen unter sich durchaus gleich sind, von einem und demselben Massentheilchen so verschiedenartige Bestimmungen empfangen kann.

Um nach der Vibrationstheorie die Ausdehnung der Körper durch die Wärme, die Processe der Schmelzung und Verdampfung zu erklären, könnte man wohl annehmen, daß sich die Molecüle jener Körper in Folge jener Sphären, welche sie umgeben, in einem Zustande der Spannung befinden. Diese Spannung wird verstärkt, wenn die Elemente der Sphären durch irgend eine Wärmequelle in Vibration versetzt werden. Wie die Schwingungsweite wächst, nimmt die Ausdehnung zu. Da nun durch die Schmelzung Wärme gebunden wird, so müßte die Schwingungsweite hierbei wieder ab-, die Anzahl der Schwingungen dagegen zunehmen, was sich ebenso wiederholen würde, wenn der Körper aus dem tropfbaren Zustande in die Gasform übergeht.

Es unterliegt wohl keinem Zweifel, daß sich die Erscheinungen

Digitized by Google

der Wärmecapacität, der latenten Wärme, der Absorption und Leitung, die Processe der Schmelzung und Verdampfung nach der Emissionstheorie, deren Grundzüge wir in den vorhergehenden Paragraphen entwickelt haben, präciser als nach der Vibrationstheorie erklären lassen. Auch die Strahlung der Wärme und die Entwickelung der letzteren durch Reiben machen jener Theorie nicht so viele Schwierigkeiten, als Manche glauben. Nur der Umstand, daß auch der Wärme eine doppelte Brechung und Polarisation zukommt, ist es, welcher in dieser Beziehung die Vibrationstheorie annehmlicher macht. Die Analogie zwischen Licht und Wärme giebt durchaus keinen hinreichenden Grund ab, auch die letztere als Resultat von Aetherschwingungen zu betrachten. Dazu kommt noch, daß man Interferenz- und Beugungserscheinungen, wie beim Lichte, noch nicht an der Wärme bemerkt hat, wiewohl gerade sie in der Theorie der Wärme von Bedeutung sein würden. Im Grunde besteht zwischen Licht und Wärme mehr Verschiedenheit als Gleichartigkeit.

Nach unseren Betrachtungen sind die erwähnten Theorien der Wärme in Beziehung auf die Grundannahme, namentlich was das Verhältniß jener Elemente zu den Massentheilchen der Materie angeht, nicht wesentlich verschieden. Eine Vereinigung beider Theorien ist allerdings nur in so fern denkbar, als mit den Vibrationen des Wärmeäthers eine Verdichtung seiner Elemente verbunden ist, vornehmlich in der Richtung, worin sich die Wärme fortpflanzt. Eine eigentliche Vermehrung der Wärmeelemente eines Körpers geschähe dann nur vermittelst dieser Vibrationen von der Wärmequelle aus. Eine solche Vereinigung beider Ansichten ist keineswegs widersprechend, wohl aber einer weiteren Untersuchung werth und fähig.

Digitized by Google

Dritter Abſchnitt.

Vom Magnetismus.

Erſtes Kapitel.

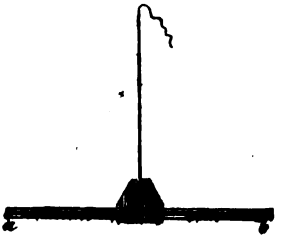
Von den magnetiſchen Erſcheinungen überhaupt.

152. Die natürlichen Magnete, welche zu den Eiſenerzen gehören, offenbaren ſich zunächſt durch die Eigenſchaft, Eiſen anzuziehen. Taucht man einen Magneten in Eiſenfeile, ſo bilden ſich an den beiden Enden lange Fäden, welche auf der Oberfläche rechtwinklig ſtehen. Gegen die Mitte hin werden die Fäden kürzer, während ſie ſich zugleich gegen dieſelbe hinneigen; in der Mitte ſelbſt aber hängen ſich gar keine Eiſentheilchen mehr an. Aehnliches ſieht man, wenn man auf einen Magneten ein Karten- oder Papierblatt legt und durch ein Sieb Eiſenfeile darauf fallen läßt. Die letztere ordnet ſich dann, wenn man ſchwach an das Blatt ſtößt, in regelmäßige Curven. Kleine Eiſenſtücke, welche man dem Magneten nahe bringt, werden gegen ſeine Oberfläche hingezogen und bleiben zuletzt an derſelben hängen, ſo daß eine mehr oder weniger bedeutende Kraft nöthig iſt, um ſie wieder abzureißen. Daſſelbe zeigt ſich, wenn dem Magneten eine kleine Eiſenkugel, welche an einem biegſamen Faden hängt, allmälig genähert wird. Auf dieſe Weiſe überzeugt man ſich leicht, daß die magnetiſche Anziehung in die Ferne wirkt, daß ſie mit wachſender Entfernung abnimmt und daß ſie ſowohl im leeren Raume als in der Luft erfolgt. Auch gewahrt man, daß ſie durch alle Subſtanzen auf beinahe gleiche Weiſe hindurch wirkt; denn man kann zwiſchen den Magneten und die Eiſenkugel beliebige Stoffe bringen, ohne eine merkliche Abnahme der Kraft wahrzunehmen; nur Eiſen macht in

Digitized by Google

dieſer Hinſicht eine Ausnahme. Ferner zeigen dieſe Verſuche, daß die Anziehung an verſchiedenen Stellen des Magneten ungleich iſt; ſie iſt in der Mitte am ſchwächſten und nimmt von dieſer gegen die beiden Enden hin zu. Wenn man ein Stückchen feinen Eiſendrahtes, das in einer dünnen, mit einem Stiele verſehenen Glaskugel eingeſchloſſen iſt, in die Nähe eines Magneten bringt, ſo ſtellt es ſich an zwei einander entgegengeſetzten Stellen der Oberfläche ſenkrecht, während es in der Mitte eine horizontale Lage annimmt. Jene Stellen ſind zugleich die Punkte, an denen ſich die Eiſenfeile am meiſten anhäuft, und wo die Tragkraft des Magneten am ſtärkſten erſcheint. Dieſe beiden Punkte nennt man die Pole des Magneten. Denkt man ſich um die Mitte des letzteren eine Linie gezogen, ſo wird dadurch der Magnet in zwei Hälften getheilt, die wohl auch ſchlechthin Pole genannt werden. Außerdem verſteht man aber auch noch unter dem Worte Pol einen fingirten Punkt im Inneren des Magneten, welcher ſich als Angriffspunkt der Reſultirenden aller partialen Anziehungen des Magneten betrachten läßt, gerade ſo, wie man ſich das Gewicht eines Körpers in ſeinem Schwerpunkte vereinigt denkt. Solcher Punkte giebt es hier zwei, welche in gewiſſer Entfernung von den Enden des Magneten liegen. Ein Magnet hat alſo in jedem Falle zwei Pole und eine Mittellinie, in welcher ſich die Kraft am ſchwächſten zeigt. Zerbricht man einen Magneten, ſo oft man will, in kleinere Stücke, ſo zeigt doch jedes Stück wieder dieſelbe Polarität wie vorher der ganze Magnet. Demnach iſt es unmöglich, einen Magneten zu bilden, der nur einen Pol hat. Zu dieſem Verſuche am geeignetſten iſt ein Magnet aus gut gehärtetem Stahle, welcher ſich wie Glas brechen läßt.

153. Wenn man einem jeden der beiden Pole a und b eines horizontal aufgehängten, frei beweglichen Magneten nach einander denſelben Pol eines anderen Magneten nahe bringt, ſo wird der eine Pol, etwa a, angezogen, dagegen der andere b abgeſtoßen. Die Pole a und b wirken alſo auf verſchiedene Weiſe auf denſelben Pol des anderen Magneten; man nennt ſie deshalb ungleichnamig. Nähert man jetzt auch den anderen Pol des zweiten Magneten nach einander den Polen a und b, ſo zeigt ſich, daß a abgeſtoßen, b aber angezogen wird. Daher ſind auch die Pole des zweiten Magneten von entgegengeſetzter Natur. Eben ſo iſt es bei den Polen



Digitized by Google

eines jeden anderen Magneten. Es hat nunmehr keine Schwierigkeit, an verschiedenen Magneten die gleichnamigen Pole nachzuweisen, denn man braucht nur ihre Pole nach einander den Polen des aufgehängten Magneten zu nähern und an jedem dieser verschiedenen Magnete denjenigen Pol zu suchen, welcher den einen Pol des Magneten ab anzieht und den anderen abstößt.

Wenn die gleichnamigen Pole zweier Magnete einander nahe kommen, so stoßen sie sich allemal ab, während sich die ungleichnamigen Pole, einander nahe gebracht, jedesmal anziehen. Zwei bewegliche Magnete richten sich deshalb, wenn sie einander nahe genug sind, immer so, daß ihre ungleichnamigen Pole einander zugewendet sind.

154. Bringt man mit einem Magneten einen kleinen Eisencylinder in Berührung, so wird er von jenem durch Anziehung getragen. Taucht man den Cylinder in Eisenfeile, so lagert sich diese auf dieselbe Weise um ihn wie um einen vollständigen Magneten; es zeigt sich eine Mittellinie, wo sich keine Eisentheilchen anhängen, während auf beiden Seiten der Mitte die Fäden der Eisenfeile eine entgegengesetzte Richtung haben. Der kleine Cylinder hat alle Eigenschaften eines Magneten; sobald man ihn aber vom Hauptmagneten abreißt, verliert er alle anziehende Kraft und die Eisenfeile fällt ab. Wenn man mit dem kleinen Cylinder, während er noch am Magneten hängt, einen zweiten in Berührung bringt, so bleibt auch dieser hängen und ist im Stande, einen dritten zu tragen, u. s. f. Auf diese Weise läßt sich eine Kette bilden, deren einzelne Glieder vollständige Magnete sind, nimmt man aber den ursprünglichen Magneten weg, so fällt die ganze Kette auseinander. Das Eisen wird also unter dem Einflusse eines Magneten selbst magnetisch. Unmittelbare Berührung ist hierzu nicht nöthig, sondern es genügt, wenn man das Eisen auf eine bestimmte Entfernung dem Magneten nahe bringt. Wird aber das Eisen wieder hinlänglich weit vom Magneten entfernt, so verräth es keine Spur von Magnetismus mehr. Stahl verhält sich gegen einen Magneten eben so wie Eisen, nur ist er weniger empfänglich für die magnetische Einwirkung als weiches Eisen, welches den Magnetismus sehr schnell annimmt. Dagegen kann der Stahl durch längere Berührung mit dem Magneten oder durch öfteres Streichen damit (in derselben Richtung) dauernd magnetisch werden, so daß er selbst nach Jahren noch seine Mittellinie und seine beiden Pole zeigt. Den Widerstand, welchen der Stahl anfänglich der magnetischen Einwirkung entgegengesetzt, nennt man gewöhnlich

Digitized by Google

seine Coercitivkraft, welche beim weichen Eisen nur sehr gering, bei gehärtetem aber schon stärker ist. Man kann mit einem Magneten so viele Eisen- oder Stahlstücke magnetisch machen, als man will, ohne daß er das Geringste an magnetischer Kraft verliert.

Aus allem bisher Angeführten ergiebt sich, daß nicht irgend ein Fluidum, worin der Magnetismus seinen Grund haben könnte, zum Eisen übergeht. Thatsächlich ist also das charakteristische Kennzeichen der sogenannten magnetischen Körper ein polarer Zustand ihrer kleinsten Massentheilchen oder Molecüle.

155. Die bisherigen Thatsachen zusammengenommen führen uns weiter zu dem Schlusse, daß der Magnetismus seinen Grund in der Constitution der betreffenden Körper selber habe. Denkt man sich einen Körper, welcher zwei entgegengesetzte Bestandtheile a und b enthält, die eine Anordnung zulassen, wie die Figur zeigt, so hat man einen vollständigen Magneten mit seiner Polarität.

Die Form, die Anordnung der Theilchen ist gerade hier die Ursache von neuen, in die Ferne wirkenden Kräften.

Soll dieser polare Zustand eine Wirkung in die Ferne äußern, so ist hierzu freilich ein besonderes Medium nöthig, welches wir aber nicht weit zu suchen brauchen. Denn wir haben verschiedene Aetherarten kennen gelernt, von denen die eine oder andere dem Zwecke entsprechen kann. Welche von ihnen aber sich hierzu am besten eignet, haben besondere Umstände zu entscheiden; es hängt dies zum Theil mit dem Elektromagnetismus, Thermomagnetismus u. dgl. zusammen. Vorläufig werden wir also in dieser Hinsicht von Aether überhaupt reden.

Wir wissen nun schon, daß der Aether um jeden der Bestandtheile a und b seine Sphären gebildet haben wird; mit beiden steht er in Verbindung. Aber der Gegensatz zwischen den Bestandtheilen a und b überträgt sich auf die Elemente des Aethers, von dem sie eingehüllt werden. Diese Uebertragung geht in doppelter Reihe in die Umgebung des Magneten fort, indem sowohl von den Bestandtheilen a als auch von den Bestandtheilen b eine Reihe von Wirkungen ausgeht, die stets mit einander fortlaufen. Dies kann nun für andere Körper keine auffallende Folge haben, sobald ihr Verhältniß zum Aether ein beträchtlich anderes ist als beim Eisen. Ist dagegen Eisen in der Nähe, so ist zu bedenken, daß dieses nicht nur die Bestandtheile a und b enthält, sondern daß sich auch der Aether um dieselben überhaupt im nämlichen Zustande befindet als innerhalb

Digitized by Google

und außerhalb des Magneten. Die Bestandtheile a des Magneten werden vermittelst des Aethers die Bestandtheile b des Eisens (oder eines diesem ähnlich zusammengesetzten Körpers) anziehen, dagegen die Bestandtheile a abstoßen, so daß vom Magneten ein Bestreben ausgeht, eine ihm entsprechende Anordnung der Theilchen im Eisen herzustellen. Wir müssen eine, wenn auch noch so geringe Richtungsveränderung der Molecüle des Eisens annehmen, wenn ein Magnet darauf einwirkt, und dem gemäß eine Spannung zwischen den Bestandtheilen, welche in ihrer Verbindung mit einander jene Molecüle bilden. Diese anomale Spannung erleiden die Bestandtheile der Molecüle gemäß der Richtung, in welcher ein Magnet auf sie wirkt; sie verliert sich, sobald der magnetische Einfluß entfernt oder die Eisenstange umgekehrt wird, in welchem letzteren Falle die Veränderung in der Richtung der Bestandtheile die entgegengesetzte wird, wodurch auch die Pole einen Wechsel erfahren.

156. In dem Widerstande, welchen die mit einander verbundenen Bestandtheile der Molecüle jener Spannung entgegensetzen, mag auch dasjenige seinen Sitz haben, was man Coërcitivkraft nennt. Es erklärt sich hieraus, warum auf den Unterschied der Härte und Weichheit des Eisens hinsichtlich der Empfänglichkeit für den Magnetismus so viel ankommt. Weiches Eisen läßt sich jene Spannung gefallen, ohne bedeutenden Widerstand zu leisten, und aus demselben Grunde kehren seine Molecüle wieder leicht in ihre vorige Stellung zurück. Das Gegentheil findet beim Stahl statt: hier dauert es länger, ehe seine Molecüle die dem Magnetismus entsprechende Richtung erhalten, aber einmal gewonnen, behalten sie selbe auch länger bei. Es ist bekannt, daß Schlagen, Bohren, Hämmern, Drehen unter Umständen das Entstehen des Magnetismus begünstigen, den schon vorhandenen aber auch schwächen kann; dies Alles sind Gelegenheiten für die Bestandtheile der Molecüle, eine besondere Stellung entweder anzunehmen oder zu verlieren. Man hat ferner die Erfahrung gemacht, daß die des Magnetismus fähigen Körper nur unter einer gewissen Temperatur magnetisch bleiben, so daß sie ihren Magnetismus verlieren, wenn man sie über dieselbe hinaus erhitzt. Erhöhung der Temperatur hat hier die Folge, daß die anomal gespannten Atome der Molecüle in ihre gewöhnliche Lage, wo sie ohne Magnetismus sind, zurückstreben. Ebenso möchte hierher die Erfahrung gehören, daß ein Magnet an Kraft verliert, wenn er ungebraucht liegt; dies setzt gleichfalls eine Abweichung von der gewöhnlichen Lage der Molecüle voraus, welche nun allmälig, sofern nicht ein neuer magneti-

Digitized by Google

ſcher Einfluß ſtattfindet, verſchwindet. Dagegen gewinnt ein Magnet an Kraft, wenn er durch ein Gewicht belaſtet und dieſes nach und nach vermehrt wird. Denn das Gewicht, indem es beſtändig herabzufallen ſtrebt, zieht an den Atomen der polariſirten Molecüle, durch welche es gehalten wird. Hierdurch wächſt die anomale Spannung zwiſchen den Atomen und mit ihr der Magnetismus ſelbſt. Reißt indeſſen das Gewicht los, ſo läßt die Spannung nach, die Molecüle kehren zum Theil wieder in ihre gewöhnliche Stellung zurück und der Magnetismus nimmt ab. Das Abfallen des Gewichtes wirkt hier ähnlich wie das Loslaſſen einer geſpannten Feder.

157. Nach Coulomb ſoll es keinen Körper geben, der gegen einen Magneten ganz unempfindlich iſt. So nehmen kleine freiſchwebende Nadeln von einem beliebigen organiſchen und unorganiſchen Stoffe eine beſtimmte Stellung an, wenn man ſie zwiſchen die entgegengeſetzten Pole ſtarker Magnete bringt. Nach dem Früheren wird vom Magneten aus eine doppelte Reihe von Zuſtänden des Aethers fortgepflanzt. Dies kann nun für Körper, die in der Richtung der Fortpflanzung liegen, nicht ganz ohne Erfolg ſein, ſofern ſie hinreichende Beweglichkeit beſitzen. Die Elemente des gebundenen Aethers dieſer Körper werden dadurch auf verſchiedene Weiſe afficirt, woraus eine Bewegung (Oscillation) der Elemente, ſei ſie auch noch ſo gering, hervorgehen muß, und es iſt ganz natürlich, wenn die leicht beweglichen Körper eine beſtimmte Stellung zwiſchen den Polen der Magnete annehmen. Gewiß würde es ſehr voreilig ſein, wenn man dieſen Körpern einen Magnetismus im eigentlichen Sinne beilegen wollte, deſſen weſentliche Kennzeichen ſie nicht verrathen. Wahrſcheinlicher iſt, daß ſie blos einem mechaniſchen Antriebe, welcher vom Magneten ausgeht, Folge leiſten.

158. Sollte an einem magnetiſchen Körper der Magnetismus gänzlich aufgehoben werden, ſo müßten ſeine Molecüle in ihre ungleichartigen Beſtandtheile zerlegt werden. So lange dies nicht geſchieht, kann man die magnetiſchen Kräfte nach Belieben zerſtören und wiedererzeugen. Erhitzt man einen Magneten bis zum Rothglühen, ſo verliert er zwar ſeine magnetiſchen Eigenſchaften, nicht aber ſeine Molecüle, deren weſentliche Natur unverändert bleibt. Nur die Anordnung in den Atomen der Molecüle iſt eine andere geworden; denn nach unſerer Anſicht liegt der Magnetismus gerade in der Anordnung der ungleichartigen Theilchen der Molecüle. Wird dieſe Anordnung wieder hergeſtellt, ſo kommt auch der Magnetismus wieder zum Vorſchein.

Digitized by Google

Die Grundvoraussetzung unserer Ansicht über den Magnetismus liegt also eigentlich nur in der Annahme zweier entgegengesetzter Bestandtheile in den Molecülen der magnetischen Körper. Uebrigens ist man ja auch schon seit längerer Zeit der Meinung von einer wirklichen Zusammengesetztheit der Metalle aus guten Gründen nicht abhold. —

Gewöhnlich erklärt man sich die magnetischen Erscheinungen durch die Annahme zweier entgegengesetzter Fluida, deren Theilchen sich abstoßen und die der anderen Flüssigkeit anziehen sollen. Diese Flüssigkeiten können nicht vom Magneten auf das Eisen übergehen, weil dann das letztere auch nach seiner Hinwegnahme vom Magneten noch eine Spur des Magnetismus verrathen müßte, was aber nicht stattfindet; denn wenn man das vom Magneten abgewendete, magnetisch gewordene Ende eines weichen Eisendrahtes abschneidet, so zeigt es sich unmagnetisch. Auch müßte im Falle eines wirklichen Ueberganges der erwähnten Flüssigkeiten eine Erschöpfung des Magneten eintreten, aber im Gegentheile seine Stärke wird durch längere Berührung mit dem Eisen vermehrt. Da endlich das Eisen, so lange es mit dem Magneten in Berührung ist, zwei Pole und eine Mittellinie hat, so müssen in ihm selbst beide Flüssigkeiten sein, während es doch im Grunde nur eine Flüssigkeit enthalten könnte, wenn wirklich etwas von dem Magneten auf das Eisen übergegangen wäre. Jeder Magnet zeigt von seiner Mitte gegen die beiden Enden hin einen Gegensatz hinsichtlich der Wirkung. Man könnte hierdurch zu der Meinung veranlaßt werden, daß an dem einen Pole vorzugsweise die eine, an dem anderen Pole vorzugsweise die andere Flüssigkeit angehäuft ist. Dies kann nicht der Fall sein, weil jede Hälfte eines Magneten wieder einen vollständigen darstellt, wenn man ihn wirklich theilt. Jedes Massentheilchen eines Magneten ist polarisirt, deshalb müssen die beiden Flüssigkeiten in jedem Molecül getrennt sein, dergestalt, daß jedes gleichartige Fluidum in allen Theilen nach derselben Seite hin gekehrt ist, woraus sich ergiebt, daß an dem einen Ende nur das eine, an dem anderen nur das andere Fluidum vorhanden sein kann. Man muß also annehmen, daß diese Fluida weder von einem Magneten auf das Eisen, noch von einem Molecül auf das nächste übergehen können. Im gewöhnlichen Eisen und Stahl sind die beiden Flüssigkeiten in jedem Molecül mit einander verbunden; durch Einwirkung eines Magneten sollen sie von einander getrennt werden. Der Stahl und das härtere Eisen setzen aber der magnetischen Einwirkung einen gewissen Widerstand entge-

Digitized by Google

gen; deshalb sah man sich genöthigt, eine besondere Kraft anzunehmen, welche der Trennung der magnetischen Flüssigkeiten entgegenwirkt; dies ist die sogenannte Coërcitivkraft. Weil aber ferner der Stahl den einmal angenommenen Magnetismus beibehält, so wurde noch eine zweite Kraft hinzugezogen, welche sich der Wiedervereinigung der nunmehr getrennten Flüssigkeiten widersetzt, denn ohne eine solche Kraft müßten sich dieselben bald wieder verbinden und der Stahl würde wieder in seinen gewöhnlichen Zustand zurückkehren. Außer den beiden entgegengesetzten magnetischen Kräften hat man also, um den Magnetismus zu erklären, noch zwei andere, im Grunde auch entgegengesetzte Kräfte nöthig, von denen man aber noch nicht weiß, ob sie identisch sind oder nicht.

Faßt man indessen die bisher erörterten magnetischen Erscheinungen scharf in's Auge, so wird man ohne Zweifel bemerken, daß sie eigentlich nirgends die Annahme zweier entgegengesetzter Fluida rechtfertigen. Alle Thatsachen, welche man für die Existenz solcher Flüssigkeiten angeführt hat, sprechen im Grunde nur für einen polaren Zustand der kleinsten Massentheilchen eines Magneten.

Zweites Kapitel.

Vom Erdmagnetismus.

159. Eine Magnetnadel, welche in einer horizontalen Ebene frei beweglich ist, nimmt immer, wo sie sich auch befinden mag, eine bestimmte Stellung an, in welche sie stets wieder zurückkehrt, so oft man sie daraus entfernt. Dies findet selbst dann statt, wenn man ihre Pole ganz umgekehrt, indem sie einen vollen Halbkreis beschreibt, um wieder in ihre anfängliche Gleichgewichtslage zurück zu kommen. Es kann diese Erscheinung nur Folge einer äußeren und zwar magnetischen Kraft sein, da eine unmagnetisirte Nadel nichts Derartiges zeigt. Für unsere Gegend hat die Magnetnadel eine Richtung von Nord-Nordwest nach Süd-Südost. Das nach Norden gerichtete Ende der Nadel wird Nordpol, das andere Südpol genannt. Die verticale Ebene, welche man sich durch die Richtung einer horizontalen Magnetnadel gelegt denken kann, nennt man den magnetischen Meridian, und den Winkel, welchen dieser mit dem geographischen Meridian bildet, die Abweichung (Declination) der Nadel. Wenn die Magnetnadel genau in ihrem Schwer-

Digitized by Google

punkte aufgehängt ist, so daß sie sich zugleich um eine horizontale Axe drehen kann, so bemerkt man noch, daß sich ihr Nordpol unter die Horizontalebene herabsenkt und mit dieser einen bestimmten Winkel macht, welchen man ihre Neigung (Inclination) nennt. Bei uns macht die Nadel mit dem Horizont einen Winkel von nahe 70 Graden. Aehnliches beobachtet man, wenn man eine kleine, an einem Faden hängende Magnetnadel in die Nähe eines größeren Magneten bringt. In der Mitte zwischen den beiden Polen hat sie eine horizontale Lage, weiter darüber hinaus senkt sich aber der eine Pol hinab. Wir müssen aus den angegebenen Erscheinungen schließen, daß die Erdkugel selbst einen Magneten darstellt, in so fern sie auf einen Magneten wirkt, wie ein größerer Magnet auf einen kleineren. Die beiden Pole des Erdmagneten fallen zwar nicht mit den Polen der Erdachse zusammen, liegen aber doch so ziemlich in deren Nähe. Man nennt deshalb auch den einen den Nordpol, den anderen den Südpol. Da sich nun die ungleichnamigen Pole anziehen, so müßte man auch eigentlich den nach Norden gerichteten Pol der Nadel ihren Südpol nennen, was von der oben angegebenen Bezeichnungsweise abweicht.

Je mehr man nach Norden kommt, desto größer wird im Allgemeinen die Inclination, so daß am Nordpol selbst die Nadel eine senkrechte Stellung annehmen muß. Kapitain Roß hat diesen Punkt wirklich erreicht; er fand ihn unter 70° 5′ nördlicher Breite und 263° 14′ östlich von Greenwich. Umgekehrt muß die Inclination abnehmen, je weiter man von Norden nach Süden wandert. In der Aequatorialzone gelangt man zu einem Punkte, wo die Nadel eine vollkommen horizontale Lage annimmt, wo also die Inclination ganz verschwindet. Weiter nach Süden hin nimmt die Inclination wieder zu, jetzt ist es aber das nach Süden gekehrte Ende, welches hinabsinkt und zwar um so tiefer, je mehr man nach Süden hin fortschreitet, so daß es in der Nähe des Südpoles der Erde einen zweiten Punkt geben muß, in dem sich die Nadel vertical stellt. Hier ist der magnetische Südpol. Wenn man alle Punkte in der Aequatorialzone, in denen sich die Nadel horizontal stellt, wenn man also die Orte ohne Inclination durch eine Linie mit einander verbindet, so erhält man den magnetischen Aequator. Dieser fällt nicht mit dem Erdäquator zusammen, sondern bildet eine Linie von doppelter Krümmung, welche jenen in zwei Punkten durchschneidet. Dies geschieht einmal im 174sten Längengrade und dann 18° östlich von Paris. Die größte südliche Breite erreicht er 14° südlich vom Erdäquator im atlantischen Ocean und ungefähr 28° westlich von Paris.

Digitized by Google

Noch weiter nach Westen hin nähert er sich dem Erdäquator und erreicht ihn 120° westlich von Paris, wo er sich wieder nach Süden wendet, in der Art, daß er 160° westlich von Paris zu einem zweiten südlichen Maximum von 3° 75′ gelangt. Seine größte nördliche Entfernung hat er ungefähr 62° östlich von Paris.

160. Die Gesammtwirkung, welche die Erde auf einen Magneten ausübt, erscheint nur als eine richtende, nicht als eine anziehende; er nimmt durch Drehung eine bestimmte Lage an, ohne sich nach Norden zu bewegen. Man sieht dies an einer Magnetnadel, welche vermittelst eines Korkes auf Wasser schwimmt; sie stellt sich alsbald in den magnetischen Meridian, bewegt sich aber nicht nach dem Nordpol hin. Es kann dies ohne Zweifel nur daher rühren, daß der erdmagnetische Nordpol von der Nadel so weit entfernt ist, daß die Länge der letzteren gegen diese Entfernung ganz verschwindet. Aus diesem Grunde wird das eine Ende der Nadel vom Nordpol der Erde eben so stark angezogen, als das andere abgestoßen wird; eine fortschreitende Bewegung kann also nicht erfolgen, welches nur dann möglich wäre, wenn die eine oder die andere dieser Kräfte das Uebergewicht hätte. Der magnetische Nordpol der Erde wirkt also auf das eine Ende unserer Nadel in einer bestimmten Richtung anziehend, der Südpol aber auf dasselbe Ende in einer bestimmten Richtung abstoßend. Hier muß die Anziehung stärker als die Abstoßung sein, weil für unsere Gegend der Nordpol näher liegt als der Südpol. Aus beiden Kräften entsteht eine Resultirende, in welcher die Wirkung des Nordpols vorherrscht. Auf das andere Ende der Nadel wirkt der Nordpol der Erde abstoßend und zwar in derselben Richtung und in eben der Stärke, womit er das vorher betrachtete Ende anzieht, während der erdmagnetische Südpol dasselbe Ende der Nadel in derselben Richtung und mit eben der Kraft anzieht, wie er das vorige abstößt. Die Resultirende der beiden letzteren Kräfte muß demnach der vorigen gleich, aber der Richtung nach entgegengesetzt sein. Eine in ihrem Schwerpunkte frei bewegliche Nadel wird also in ihren Polen von zwei gleichen, parallelen und entgegengesetzten Kräften angegriffen, wodurch nur eine Drehung der Nadel um ihren Schwerpunkt hervorgebracht werden kann. Die Nadel befindet sich in der Gleichgewichtslage, sobald ihre magnetische Axe oder die Verbindungslinie ihrer Pole mit der Richtung jener Resultirenden zusammenfällt.

Bei der gewöhnlichen Declinationsnadel, welche sich nur in einer horizontalen Ebene (um eine verticale Axe) drehen kann, wirkt lediglich der horizontale Antheil der erdmagnetischen Kraft und dieser

Digitized by Google

wird um so kleiner, je weiter man sich vom Aequator entfernt oder je mehr die Inclination wächst. Die Kraft, mit welcher der Erdmagnetismus die Declinationsnadel in den magnetischen Meridian zurückführt, wenn sie daraus entfernt worden ist, läßt sich leicht berechnen. Es sei a b die Richtung des magnetischen Meridians, nach welcher auch die erdmagnetische Kraft wirkt. Die letztere kann man der Größe und Richtung nach durch eine mit a b parallele Linie n r darstellen. Diese zerlegt sich nach dem Parallelogramm der Kräfte in die auf einander senkrechten Componenten n p und n q, von denen die erstere, welche in der Richtung der Nadel wirkt, keine Aenderung in der Lage der Nadel hervorbringt, während die letztere, rechtwinklig auf die Richtung der Nadel wirkend, dieselbe zu einer Drehung nach dem magnetischen Meridian hin bestimmt. Nun ist, wenn man die Gesammtkraft n r des Erdmagnetismus durch m ausdrückt, n q = m sin v, wo v gleich dem Winkel ist, um welchen die Nadel aus dem magnetischen Meridian abgelenkt worden.

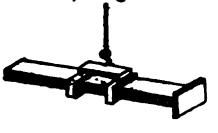
Wenn man eine Stange von weichem Eisen in den magnetischen Meridian und zwar in die Richtung der Inclinationsnadel bringt, so wird sie magnetisch in der Art, daß sich ihr unteres Ende als ein Südpol, ihr oberes als ein Nordpol zu erkennen giebt, wenn man sie mit einer kleinen, empfindlichen Magnetnadel untersucht. Der Erdmagnetismus wirkt also auf ähnliche Weise wie ein gewöhnlicher Magnet auf das Eisen; er übt diese Wirkung auch dann noch, wenn das Eisen einen beliebigen Winkel mit der Richtung der Inclinationsnadel macht, natürlich in um so geringerem Maße, je mehr sich die Stange von der erwähnten Richtung entfernt. Eine Eisenstange kann durch den Einfluß des Erdmagnetismus auch bleibend magnetisch gemacht werden, wenn man ihr mit einem Hammer einige Schläge ertheilt. Daraus erklärt es sich, daß fast alle Werkzeuge eines Schlossers magnetisch sind. Auch hat man erfahren, daß fast alle Eisenstangen, welche eine Zeit lang vertical standen und in dieser Stellung rosteten, einen bleibenden Magnetismus angenommen haben.

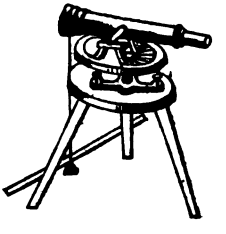
161. Zur ungefähren Messung der Declination kann man eine Magnetnadel benutzen, welche sich mittelst eines Achathütchens auf einer Spitze von hartem Stahle dreht. Diese Spitze ist zugleich der Mittelpunkt eines getheilten Horizontalkreises, welcher in seiner eigenen Ebene um eine verticale Axe gedreht werden kann. Das Ganze

Digitized by Google

befindet sich in einem Gehäuse, an dessen Seite ein Fernrohr angebracht ist. Die Axe des letzteren ist parallel mit einer Linie, welche man sich vom Nullpunkte des getheilten Kreises über dessen Mittelpunkt nach dem Theilstriche 180 gezogen denken kann. Man bringt das Fernrohr genau in den astronomischen Meridian und sieht nach, welchen Winkel der magnetische Meridian mit dem eben angeführten macht. Ist der Apparat so gestellt, daß die Nadel auf den Nullpunkt der Theilung zeigt, so ist die Axe des Fernrohres mit der Richtung der Nadel oder mit der Richtung des magnetischen Meridians parallel. Man sieht leicht ein, wie dieser Apparat auch als Winkelmeßinstrument gebraucht werden kann.

Zur genaueren Bestimmung der Abweichung und ihrer Veränderungen dient das sogenannte Magnetometer von Gauß. Es besteht aus einem mehrere Pfund schweren Magnetstabe, welcher in einer Hülse von Messing liegt, die von einem in der Mitte der Decke des Locals befestigten ungedrehten Coconfaden oder von einem Metalldrahte getragen wird. An dem einen Ende des Stabes befindet sich ein Planspiegel, dessen Ebene vollkommen senkrecht zur Axe des Magneten ist. Dem Spiegel gegenüber ist in einer Entfernung von etwa 16 Fuß ein Theodolith aufgestellt, dessen Fernrohraxe gerade in der Richtung des magnetischen Meridians auf die Mitte des Spiegels gerichtet ist. Am Stative des Theodolithen befindet sich eine horizontale in Millimeter getheilte Scale, welche auf der Richtung des magnetischen Meridians rechtwinklig steht. Ueber der Mitte des Fernrohrobjectivs hängt ein feiner, durch ein Gewicht gespannter Faden herab, welcher die Mitte der Scale durchschneidet und mit dem Fadenkreuz des Fernrohres in derselben verticalen Ebene, nämlich in der Ebene des magnetischen Meridians liegt. Da man durch das Fernrohr im Spiegel einen Theil der Scale sieht, so kann man leicht beobachten, welcher Theilstrich durch den verticalen Theil des Fadenkreuzes im Gesichtsfelde des Fernrohres gedeckt wird. Ist nun die Axe des Fernrohres senkrecht zur Ebene des Spiegels, so ist sie parallel mit der Axe des Magnetstabes, und die Mitte der Scale, der Faden des Lothes und der verticale Theil des Fadenkreuzes werden





Digitized by Google

einander decken. Der Nullpunkt der Scale erscheint dann gerade in der Axe des Fernrohres und die Verticalebene des letzteren ist genau die des magnetischen Meridians. Der Winkel, welchen in diesem Falle jene Ebene oder der magnetische Meridian mit dem astronomischen macht, läßt sich leicht bestimmen, wenn man das Fernrohr auf einen im letzt erwähnten Meridian befindlichen Punkt richtet und den durchlaufenen Bogen auf dem Horizontalkreise des Theodolithen abliest. Sobald aber der Magnet seine Lage ändert, erscheint nicht mehr der Nullpunkt, sondern ein anderer Theilstrich in der Axe des Fernrohres. Bewegt sich die dem letzteren zugewandte Hälfte des Magnetstabes rechts, so bewegt sich die Scale im Spiegel links vom verticalen Theile des Fadenkreuzes und umgekehrt. Die auf diese Weise sich kundgebenden Abweichungen des Magnetstabes können mit großer Genauigkeit bestimmt werden, da mit einer kleinen Drehung des Magneten schon eine sehr bedeutende Veränderung im Spiegelbilde der Scale verbunden ist. Der Abstand zweier Theilstriche der Scale kann leicht auf Bogen- oder Winkelmaß reducirt werden, wenn die Entfernung der Scale vom Spiegel genau gemessen ist. Damit die Beobachtungen brauchbar ausfallen, muß die Lage der Scale gegen das Fernrohr unverrückt bleiben. Um nun eine etwa stattgefundene Verrückung des Fernrohres leicht entdecken zu können, ist auf der dem Theodolithen gegenüber befindlichen Wand ein Strich (Mire) angebracht, welchen das Fadenkreuz des Fernrohres bei richtiger Stellung des letzteren immer decken muß. Das Magnetometer ist in einem eisenfreien Locale aufgestellt, in dem sich noch eine astronomische Uhr zum Behufe von Zeitbestimmungen befindet.

Den Beobachtungen zufolge ist der Magnetometerstab nie in voller Ruhe, sondern macht immer mehr oder weniger bedeutende Schwingungen. Es kommt nun darauf an, aus den letzteren die Lage des magnetischen Meridians für einen gegebenen Zeitpunkt zu bestimmen. Zu diesem Behufe nimmt man das Mittel aus zwei solchen Stellungen des Stabes, welche zweien, genau um eine Schwingungsdauer von einander abstehenden Augenblicken entsprechen. Dieses Mittel giebt offenbar die Lage des magnetischen Meridians für den in der Mitte zwischen den gegebenen Augenblicken liegenden Zeitpunkt an. Sei nun t die Schwingungsdauer des Stabes; ferner seien s und s′ die Theilstriche, welche am Ende der Zeiten $\delta - \frac{1}{2}t$, $\delta + \frac{1}{2}t$ vom Fadenkreuze des Fernrohres gedeckt werden; dann ist $\frac{s+s'}{2}$ die Zahl, welche der Lage des magnetischen Meridians am Ende der

Digitized by Google

Zeit δ entspricht. Ist z. B. die Schwingungsdauer des Magnetstabes gleich 20″, und beobachtet man während der Zeit 15ʰ 30′ 10″, daß das Fadenkreuz des Fernrohres den Theilstrich 868 im Spiegel deckt, und während der Zeit 15ʰ 30′ 30″ den Theilstrich 867, 3; so giebt der Theilstrich $\frac{868 + 867,3}{2} = 867,65$ auf der Scale die Lage des magnetischen Meridians zur Zeit 15ʰ 30′ 20″ an. Um eine größere Sicherheit zu erzielen, kann man auch mehrere Beobachtungen, welche sich auf die Zeiten $\delta - 5/2\ t$, $\delta - 3/2\ t$, $\delta - 1/2\ t$, $\delta + 1/2\ t$, $\delta + 3/2\ t$, $\delta + 5/2\ t$ beziehen, machen und aus je zwei auf einander folgenden das Mittel nehmen. Der Durchschnitt aus allen diesen Mitteln giebt die Lage des magnetischen Meridians für das Ende der Zeit δ. Man zählt hierbei die Schwingungen von dem Augenblicke an, wo ihre Geschwindigkeit einen gewissen Grenzwerth erreicht hat. Um den letzteren früher herbeizuführen, kann man sich eines sogenannten Beruhigungsstabes bedienen, d. h. eines Magneten, der nur halb so lang und breit als der Hauptmagnet ist, durch welchen sich der letztere nach Belieben in schwächere oder stärkere Schwingungen versetzen läßt, indem man ihm hinter dem Theodolithen eine horizontale, aber zum magnetischen Meridian senkrechte Lage giebt. Er bringt dann zufolge der Anziehung des einen und der Abstoßung des anderen Poles eine Ablenkung des Hauptmagneten hervor, welche je nach der Lage seines Nordpols bald östlich bald westlich sein kann; sie wird aber um so kleiner, je mehr sich der Beruhigungsstab der verticalen Stellung nähert und hört in der letzteren selbst ganz auf, weil in diesem Falle der eine Pol den zugewandten Pol des Hauptmagneten ebenso stark abstößt als ihn der andere anzieht.

162. Die Declination ist, wie schon bemerkt, unaufhörlichen Veränderungen unterworfen, von denen manche ein bestimmtes Gesetz befolgen und deshalb regelmäßige Veränderungen genannt werden. Im Jahre 1580 war die Declination in Paris östlich und betrug etwa 11° 30′, im Jahre 1663 war sie Null und ist seitdem wieder westlich geworden. Im Jahre 1700 betrug die westliche Abweichung 8° 10′, im Jahre 1780 : 19° 55′ und erreichte 1814 ihr Maximum von 22° 34′. Von hier an ging der Nordpol der Nadel wieder allmälig nach Osten, so daß die westliche Abweichung im Jahre 1835 auf 22° 4′ und 1837 auf 18° 37′ 30, 55′ zurückgekommen war. Auch jetzt dauert noch die Abnahme der westlichen Declination fort und es ist zu erwarten, daß der magnetische Meri-

Digitized by Google

dian mit dem astronomischen wieder zusammenfallen und hiernach die Abweichung des Nordpoles eine östliche werden wird. Aenderungen dieser Art heißen *seculäre*. Außer diesen giebt es aber auch noch *tägliche Veränderungen* (*Variationen*), welche regelmäßig wiederkehren und mit der erwärmenden Kraft der Sonne in unverkennbarem Zusammenhange stehen. Der tägliche Gang der Magnetnadel ist im Allgemeinen von der Art, daß die westliche Abweichung des Morgens gegen 7 – 8 Uhr am kleinsten ist, daß sie von hier an allmälig zunimmt und Nachmittags um 1—2 Uhr am größten wird. Darauf geht sie wieder nach Osten hin zurück, um des Nachts oder am folgenden Morgen wieder das Minimum ihrer westlichen Abweichung zu erreichen. Die Schwingungsweite der täglichen Variationen oder der Winkel zwischen dem östlichen und westlichen Stand der Nadel ist im Sommer größer als im Winter. Nach Beobachtungen in Göttingen von 1834—37 beträgt dieser Winkel im Mittel für ein ganzes Jahr 16′ 34″, in den Wintermonaten vom October bis März 7′ 58″ und vom April bis zum October 12′ 48″.

Südlich vom Aequator finden die täglichen Variationen in entgegengesetzter Richtung statt, indem hier das Südende der Nadel sich nach Westen bewegt, wenn nördlich vom Aequator das Nordende diese Richtung einschlägt. Eben so hat auf der südlichen Halbkugel das Südende der Nadel eine östliche Bewegung, wenn auf der nördlichen das Nordende nach Osten geht.

Man kann die Variationen der Declination graphisch darstellen, wenn man die Zeit als Abscisse und die Aenderung der Declination als Ordinate einer krummen Linie betrachtet, welche einer Reihe in bestimmten Zeitintervallen gemachten Beobachtungen entspricht. Wenn man die Curven, welche die gleichzeitig gemachten Beobachtungen verschiedener weit von einander entfernter Orte darstellen, mit einander vergleicht, so bemerkt man häufig eine merkwürdige Uebereinstimmung; nicht allein die Hauptform, sondern auch selbst kleine Biegungen der einen Curve lassen sich in der anderen wieder erkennen.

Mit Hülfe des *Gauß*ischen Magnetometers sind seit einer längeren Reihe von Jahren an den verschiedensten Orten der Erde in voraus bestimmten Terminen gleichzeitige Beobachtungen angestellt worden, welche schon zu manchem interessanten Resultate geführt haben und gewiß noch tiefere Aufschlüsse über den Erdmagnetismus liefern werden. Näheres findet sich in den Resultaten des magnetischen Vereins, herausgegeben von *Gauß* und *Weber*.

Digitized by Google

Neben den erwähnten regelmäßigen Veränderungen der Declination kommen noch unregelmäßige Aenderungen oder sogenannte Störungen vor, welche häufig die ersteren übertreffen und mitunter sogar unkenntlich machen. Plötzliche Störungen in der Richtung der Magnetnadel zeigen sich namentlich zur Zeit eines Nordlichtes und zwar nicht allein da, wo letzteres gerade sichtbar ist, sondern auch an ganz anderen, weit entfernten Orten, wo man dieses Phänomen nicht wahrnehmen kann. Auch Erdbeben bringen in der Regel bedeutende Schwankungen der Magnetnadel, vielleicht nur durch eine Erschütterung, hervor. Uebrigens hat Kreil die interessante Beobachtung gemacht, daß bedeutende Störungen an denselben Jahrestagen wiederkehren. Ueberhaupt hat sich aus gleichzeitigen Beobachtungen an verschiedenen Orten ergeben, daß nicht nur größere Schwankungen der Declination, sondern auch kleinere an diesen Orten gleichzeitig stattfinden.

Nach Schübler hängt die tägliche Variation der Magnetnadel auch von der Witterung ab, und nach Kämtz sollen die Winde einen Einfluß in der Art üben, daß die Declinationsnadel bei Nord- oder Nordostwinden östlicher zeige als bei West- oder Südwestwinden.

163. Um die magnetische Neigung (Inclination) zu bestimmen, wendet man eine Nadel an, welche um eine horizontale Are leicht drehbar ist. Die letztere geht durch den Mittelpunkt eines getheilten Verticalkreises, auf dem man den Winkel, welchen die Nadel mit dem Horizont macht, jederzeit ablesen kann. Das Instrument muß jedoch zu diesem Behufe in der Richtung des magnetischen Meridians aufgestellt sein. Die Construction eines solchen Instrumentes ist mit bedeutenden Schwierigkeiten verbunden, weil es begreiflich gar nicht leicht ist, eine Nadel genau in ihrem Schwerpunkte zu unterstützen und um eine horizontale Are sehr beweglich zu machen, wie es hier doch eigentlich der Fall sein muß. Indessen kann man die Inclination der Nadel aus der Anzahl der Schwingungen, welche sie in einer gegebenen Zeit macht, mit hinreichender Genauigkeit bestimmen. Man läßt nämlich die Nadel zuerst in der Richtung des magnetischen Meridians und dann in einer darauf senkrechten Ebene schwingen. Im ersten Falle wirkt auf die Inclinationsnadel die ganze erdmagnetische Kraft, welche — P sein mag, im zweiten Falle aber nur der verticale Antheil des Erdmagnetismus, was man daraus erkennt, daß sich die Nadel, wenn sie in einer auf den magnetischen Meridian senkrechten Ebene schwingt, ganz vertical stellt, sobald sie zur Ruhe gekommen ist. Bezeichnet man nun die Inclination durch i, so hat

Digitized by Google

man für den verticalen Theil der erdmagnetischen Kraft P sin i. Die Anzahl der Schwingungen, welche die Nadel im magnetischen Meridian binnen einer gewissen Zeit macht, sei gleich N, diejenige in der anderen Lage während derselben Zeit, gleich n; dann hat man, weil nach den Pendelgesetzen sich die bewegenden Kräfte wie die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten, $P : P \sin i = N^2 : n^2$ und hieraus $\sin i = \frac{n^2}{N^2}$.

Die Variationen der Inclination lassen sich auf ähnliche Weise wie die der Declination beobachten, indem man an dem um eine horizontale Axe leicht beweglichen Magnetstabe einen Spiegel befestigt, welcher das Bild einer entfernten Scale in das Fernrohr des Beobachters reflectirt. Die Inclination ist wie die Declination nach Ort und Zeit sehr verschieden und ähnlichen Veränderungen unterworfen. Nach Kreil's Beobachtungen hat die Inclination täglich drei Maxima und drei Minima. Ihr erstes Maximum zeigt sie im Sommer zwischen 8 und 9 Uhr, im Winter zwischen 10 und 11 Vormittags, das zweite Maximum erreicht sie das ganze Jahr hindurch um 3 Uhr Nachmittags und das dritte nach Mitternacht. Das erste Minimum stellt sich gegen Mittag ein, das zweite in den späteren Abendstunden und das dritte in den Morgenstunden. Zu Paris betrug die Inclination im Jahre 1671 : 75°; seitdem ist sie in fortwährender Abnahme begriffen.

164. Die Intensität des Erdmagnetismus an verschiedenen Orten der Erde und zu verschiedenen Zeiten läßt sich nach Borda bestimmen, wenn man die Schwingungsdauer einer und derselben Nadel an diesen Orten beobachtet. Denn eine solche Nadel schwingt, wenn sie aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt wird, unter dem Einfluß des Erdmagnetismus wie ein Pendel, und die beschleunigenden Kräfte sind, wie schon bemerkt wurde, den Quadraten der Schwingungszahlen proportional. Nennt man nun M die magnetische Kraft, welche die Nadel an einem gewissen Orte beschleunigt, N die Anzahl der Schwingungen, welche sie in einer gegeben Zeit macht, m die beschleunigende Kraft an einem anderen Orte und n die Zahl der Schwingungen, welche die Nadel hier in derselben Zeit vollendet, so hat man $M : m = N^2 : n^2$ oder $\frac{M}{m} = \frac{N^2}{n^2}$ für das Verhältniß der beschleunigenden Kräfte an diesen beiden Orten der Erde. Man sieht, wie man aus dieser Formel den Werth von M erhält, wenn man den von m als Einheit annimmt. Doch setzt diese Methode voraus,

Digitized by Google

daß sich der magnetische Zustand der Nadel von einem Orte zum anderen nicht geändert habe.

Will man die Intensitäten der ganzen erdmagnetischen Kraft an verschiedenen Orten mit einander vergleichen, so wählt man zu den Versuchen eine Inclinationsnadel. Die Schwingungen einer Declinationsnadel (welche sich nur in einer horizontalen Ebene drehen kann) werden blos durch den horizontalen Theil der magnetischen Erdkraft hervorgebracht. Bezeichnet man nun durch M die in der Richtung der Inclinationsnadel wirkende Totalkraft des Erdmagnetismus und durch i den Winkel, welchen die Inclinationsnadel mit dem Horizont macht, so hat man $m = M \cos i$ für die horizontale Seitenkraft des Erdmagnetismus, welche die Declinationsnadel beschleunigt. Aus dieser Formel ergiebt sich die erdmagnetische Totalkraft $M = \frac{m}{\cos i}$. Man kann deshalb zu den Intensitätsbestimmungen des Erdmagnetismus auch eine Declinationsnadel gebrauchen, was um so mehr zu empfehlen ist, da man mit einer solchen Nadel immer genauere Resultate als mit einer Inclinationsnadel erhält. Auf solche Weise ergeben sich nur die Verhältnißzahlen der erdmagnetischen Kraft an verschiedenen Orten der Erde. Es ist aber wichtig, dieselbe auf ein absolutes Maß zu bringen, wofür Gauß eine höchst scharfsinnige Methode angegeben hat, die wir etwas später ihren wesentlichen Momenten nach berühren werden.

Die Stärke des Erdmagnetismus ist, wie die Declination und Inclination, an verschiedenen Orten sehr ungleich; sie nimmt im Allgemeinen von den wärmeren nach den kälteren Gegenden zu, ist in der Nähe des Aequators am kleinsten und wächst von hier aus um so mehr, je weiter man nach Norden oder Süden kommt. Auch an demselben Orte ist die Intensität des Erdmagnetismus veränderlich und ähnlichen Variationen unterworfen wie die Declination und Inclination. Um die täglichen Variationen der horizontalen Intensität des Erdmagnetismus jeder Zeit schnell und sicher beobachten zu können, hat Gauß einen einfachen Apparat construirt, dem er den Namen Bifilar-Magnetometer gegeben hat. Er besteht aus einem Magnetstabe, welcher an zwei, von seinem Schwerpunkte gleich weit entfernten parallelen und gleich langen Drähten aufgehängt ist. Denkt man sich an die Stelle des Magneten einen unmagnetischen Stab, so wird für diesen Gleichgewicht bestehen, wenn die Fäden mit dem Schwerpunkte desselben in einer und derselben Verticalebene liegen. Sobald der Körper aus dieser Lage entfernt wird, erleiden die

Digitized by Google

Fäden eine Windung, vermöge deren ein Bestreben entsteht, die Gleichgewichtslage wieder herzustellen. Die Kraft, mit welcher die Fäden in die parallele Lage zurückstreben, ist bei gleichem Ablenkungswinkel um so größer, je weiter sie von einander entfernt sind. Bei einem magnetischen Stabe wird nun die Lage desselben sowohl von der richtenden Kraft des Erdmagnetismus als auch von derjenigen der Fäden bestimmt. Die Drähte sind an einer Scheibe befestigt, durch deren Drehung der Stab in eine zum magnetischen Meridian senkrechte Lage gebracht werden kann. Durch die geringste Aenderung in der horizontalen Intensität des Erdmagnetismus wird der Magnetstab aus seiner Ruhelage entfernt; er nähert sich dem magnetischen Meridian, wenn jene Intensität stärker wird, er entfernt sich von demselben, wenn sie abnimmt. Die Schwankungen des Stabes werden auf dieselbe Weise beobachtet, wie die Abweichungen des früher beschriebenen einfachen Magnetometers.

165. Nach dem Vorhergehenden wird die Wirkung, welche der Erdmagnetismus auf einen Punkt an der Erdoberfläche ausübt, durch Declination, Inclination und horizontale Intensität bestimmt. Hat man diese Stücke für alle Punkte der Erdfläche ermittelt, so geben sie zusammen für einen gewissen Zeitpunkt den magnetischen Zustand der Erdkugel zu erkennen. Man kann zu diesem Behufe jedes dieser Bestimmungsstücke besonders betrachten und auf einer Karte zur Darstellung bringen, indem man alle Orte der Erdfläche, in denen das Stück denselben Werth hat, durch eine Curve mit einander verbindet. Auf diese Weise erhält man drei Systeme krummer Linien, von denen das erste die Orte gleicher Declination, das zweite die Orte gleicher Inclination und das dritte endlich die Orte gleicher Intensität enthält. Jene Linien, welche die Orte gleicher Declination mit einander verbinden, nennt man isogonische, solche, in deren Punkten gleiche Inclination herrscht, isocliniſche und die dritten, deren Punkte die Orte gleicher Intensität bezeichnen, isodynamische Linien. Halley hat im Jahre 1700 die erste Declinationskarte entworfen, d. h. eine Karte, in welche die isogonischen Linien aufgetragen sind. Für das Jahr 1780 wurde eine solche Karte von Hansteen und für 1833 eine von Barlow herausgegeben. Die Vergleichung dieser Karten zeigt, daß der Lauf der isogonischen Linien beträchtlichen Veränderungen unterworfen ist, wie sich dies nach den früheren Betrachtungen nicht anders erwarten läßt. Von Interesse ist eine Linie ohne Abweichung, nämlich eine solche, auf welcher die Richtung der horizontalen Magnetnadel

Digitized by Google

mit der Richtung des geographiſchen Meridians zuſammenfällt; ſie geht rings um die Erde und theilt ihre Oberfläche in zwei Theile; auf dem einen Theil, und zwar auf dem atlantiſchen Ocean, in Europa und Afrika, iſt die Abweichung der Nadel eine weſtliche, auf dem anderen Theile eine öſtliche. Dieſe Linie durchſchneidet die öſtliche Spitze von Südamerika, geht öſtlich von Weſtindien durch den atlantiſchen Ocean in den Continent von Nordamerika, zieht ſich, nachdem ſie die Hudſonsbai durchlaufen hat, durch den aſtronomiſchen und magnetiſchen Nordpol der Erde und tritt öſtlich vom weißen Meere in den Continent der alten Welt ein; darauf geht ſie durch das caſpiſche Meer, ſchneidet die Oſtſpitze von Arabien ab und wendet ſich nach Neuholland, von wo ſie durch den aſtronomiſchen und magnetiſchen Südpol der Erde in ſich ſelbſt zurückläuft. Eine zweite kleinere geſchloſſene Linie ohne Abweichung exiſtirt im öſtlichen Aſien und dem angrenzenden Meere. Innerhalb des Raumes, welcher von dieſer Linie eingeſchloſſen wird, iſt die Abweichung weſtlich.

Die erſte Inclinationskarte wurde von Hanſteen im Jahre 1780 conſtruirt. Der Lauf der iſocliniſchen Linien iſt nicht minder wie der der iſogoniſchen mit der Zeit veränderlich.

Die iſodynamiſchen Linien ſind geſchloſſene Curven, welche aber dem magnetiſchen Aequator nicht parallel ſind; ſie ſtimmen ungefähr mit den früher erwähnten iſothermiſchen Linien überein. Nach den von Gauß berechneten Werthen der totalen Intenſität und den hieraus conſtruirten iſodynamiſchen Linien finden ſich auf der nördlichen Halbkugel zwei Orte, in denen die Intenſität des Erdmagnetismus ein Maximum iſt; der eine liegt in Nordamerika weſtlich von der Hudſonsbay, der andere in Sibirien. Auch auf der ſüdlichen Halbkugel giebt es ein Maximum der Intenſität und zwar in der Nähe des Südpoles der Erde. Außer dieſen größten Werthen hat man noch zwei Punkte der kleinſten Intenſität in der Nähe des Aequators gefunden; der eine liegt nordöſtlich von Neuholland, der andere in der Nähe von St. Helena.

An den Punkten, wo die Intenſität des Erdmagnetismus einen größten Werth hat, ſtellt ſich die Inclinationsnadel nicht vertical; dieſe Punkte ſind alſo auch keine Pole im gewöhnlichen Sinne des Worts, in ſo fern man darunter nur ſolche Orte der Erde verſteht, an welchen die horizontale Intenſität verſchwindet. Nach dem Früheren giebt es auf der Erde nur zwei Punkte, wo das Letztere ſtattfindet, wo ſich alſo die Nadel vertical ſtellt. Die Erde hat demnach auch nur zwei magnetiſche Pole. Die gerade Linie, welche dieſelben

Digitized by Google

verbindet, geht nicht durch den Mittelpunkt der Erde, sondern bildet die Sehne eines Bogens von 161° 13′, welcher zu dem durch die beiden Pole gelegten größten Kreise gehört.

166. Gauß betrachtet in seiner Theorie die erdmagnetische Kraft als die Gesammtwirkung aller magnetisirten Theilchen des Erdkörpers. Die Gesammtheit dieser Theilchen muß auf jeden Punkt im Raume eine bestimmte Wirkung ausüben, die aber von einem Punkte zum anderen veränderlich sein wird. Die Wirkung ist also abhängig von der geographischen Länge und Breite des Punktes an der Erdoberfläche. Die verschiedenen Bestandstücke des Erdmagnetismus lassen sich hiernach durch Gleichungen ausdrücken, die nach trigonometrischen Functionen der geographischen Länge und Breite fortschreiten, während die in den Gliedern vorkommenden Coefficienten constante Größen sind, welche von der Art und Weise abhängen, wie der freie Magnetismus im Inneren der Erde vertheilt ist. Da diese Vertheilung nun unbekannt ist, so müssen die Coefficienten dadurch ermittelt werden, daß man die verschiedenen Elemente des Erdmagnetismus, welche in jenen Gleichungen ihren Ausdruck finden, an verschiedenen Orten der Erde durch Beobachtung bestimmt. Combinirt man so viele Beobachtungen mit einander, als Coefficienten vorkommen, so lassen sich die letzteren bestimmen. Man kann dabei mehr Beobachtungen zu Hülfe nehmen, als eigentlich Coefficienten vorhanden sind, und daraus nach der Wahrscheinlichkeitsrechnung (Methode der kleinsten Quadrate) die mit den kleinsten Fehlern behafteten Mittelwerthe der Coefficienten berechnen. Werden diese in die erwähnten Gleichungen gesetzt, so ergeben sich aus den letzteren die verschiedenen Elemente des Erdmagnetismus an jedem Orte der Erde, wenn man die bekannte Länge und Breite des Ortes substituirt. Zunächst bestimmt Gauß aus seinen Gleichungen die Werthe der verticalen Intensität nebst der nördlichen und westlichen Componente der horizontalen Intensität, woraus sich dann die Declination, Inclination und die totale Intensität des Erdmagnetismus ergeben. Von besonderem Interesse sind die Gleichgewichtslinien, welche von solcher Beschaffenheit sind, daß sie die Richtung der Declinationsnadel stets rechtwinklig durchschneiden, so daß sich aus dem Laufe dieser Linien die Richtung der horizontalen Magnetnadel für jeden Ort der Erde jederzeit sehr einfach bestimmen läßt. Nach Gauß kann die Wirkung des Erdmagnetismus etwa der vereinigten Wirkung von acht einpfündigen Magnetstäben in jedem Cubikmeter der Erde gleich betrachtet werden.

Digitized by Google

Drittes Kapitel.

Von den Wirkungsgesetzen magnetischer Kräfte.

167. Diese Gesetze sind zuerst von Coulomb genauer untersucht worden. Er wendete dabei zwei Methoden an, welche beide im Ganzen dasselbe Resultat lieferten. Die eine dieser Methoden gründet sich auf die Pendelgesetze. Wir wissen, daß eine frei ausgehängte Magnetnadel Schwingungen macht, welche denen eines Pendels ähnlich sind; nur ist hier das bewegende Princip nicht die Schwere, sondern irgend eine magnetische Kraft. Hier wie dort verhalten sich aber die bewegenden Kräfte wie die Quadrate der Schwingungszahlen oder umgekehrt wie die Quadrate der Schwingungszeiten. Sei p die Kraft, welche auf die Nadel wirkt, t die Zeit, worin sie eine Schwingung vollendet, ferner p′ und t′ die entsprechenden Größen für eine andere Nadel; dann hat man nach den Gesetzen des Pendels $p : p' = t'^2 : t^2$ und auch, wenn man beziehungsweise durch n und n′ die Anzahl der Schwingungen bezeichnet, welche die Nadeln während der Zeiteinheit machen, $p : p' = n^2 : n'^2$.

Bringt man nun einer Nadel, welche unter dem Einflusse des Erdmagnetismus schwingt, einen anderen Magneten nahe, so müssen ihre Schwingungen je nach den Umständen beschleunigt oder verzögert werden. Man nähere z. B. dem Südpole der Nadel den Nordpol eines vertical gehaltenen Magnetstabes von so bedeutender Länge, daß die Wirkung seines anderen Poles auf die Nadel außer Acht gelassen werden kann. Die Schwingungen der letzteren müssen alsdann beschleunigt werden. Für eine gewisse Entfernung beider Pole sei N′ die Anzahl der Schwingungen, welche die Nadel in einer Minute macht, und P′ die beschleunigende Kraft des Stabes, während N und P die entsprechenden Größen für den Fall sein mögen, wo nur der Erdmagnetismus seine Wirkung auf die Nadel übt. Man hat dann wieder $P' : P = N'^2 : N^2$ oder $\frac{P'}{P} = \frac{N'^2}{N^2}$. Jetzt entferne man den Nordpol des Stabes um eine bestimmte Weite von dem Südpole der Nadel. Die Anzahl der Schwingungen, welche sie nunmehr in 1 Minute macht, sei gleich N″ und die jetzt auf die Nadel wirkende Kraft des Stabes gleich P″. Es ist dann offenbar wieder $P'' : P = N''^2 : N^2$, wenn man die letzt erwähnte Kraft mit der alleinigen Wirkung des Erdmagnetismus vergleicht. Die Kraft P′ ist ohne Zweifel gleich der Summe der magnetischen Kraft x des Stabes und der Kraft P des Erdmagnetismus, also $P' = P + x$ und daher $x = P' - P$.

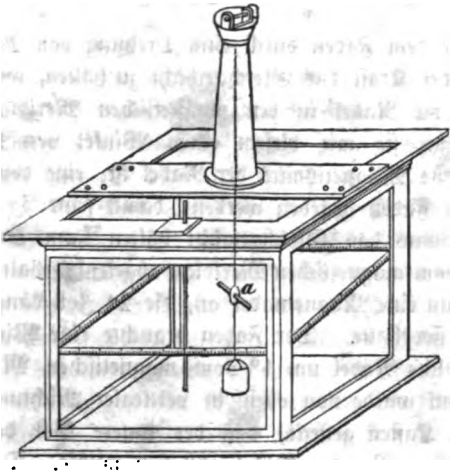
Digitized by Google

Eben so ist für die zweite Entfernung des Stabes $P'' = P + x'$, wo x' die Kraft bezeichnet, welche der Nordpol des Stabes in dieser Entfernung auf den Südpol der Nadel ausübt. Demnach $x' = P'' - P$. Verbindet man nun die beiden obigen Proportionen mit einander, so erhält man $P' - P : P'' - P = N'^2 - N^2 : N''^2 - N^2$ oder $\frac{P' - P}{P'' - P} = \frac{N'^2 - N^2}{N''^2 - N^2}$.

Bei Coulomb's Versuche war die Entfernung des Stabes im zweiten Falle doppelt so groß als im ersten. Unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus machte die Nadel 15 Schwingungen in der Minute, unter Mitwirkung des Stabes 41 Schwingungen im ersten Falle und 24 im zweiten, wo sie doppelt so weit vom Stabe entfernt war. Substituirt man diese Werthe in jene Gleichung, so erhält man $\frac{P' - P}{P'' - P} = \frac{41^2 - 15^2}{24^2 - 15^2} = 4$.

Man sieht also, daß die anziehende Kraft der magnetischen Pole in doppelter Entfernung 4 Mal kleiner als in der einfachen ist, was ebenso auch von der Abstoßung gilt, so daß sich die magnetischen Anziehungen und Abstoßungen umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen verhalten.

Bei seiner zweiten Methode bediente sich Coulomb eines Instrumentes, welches überhaupt zur Messung feiner Kräfte sehr geeignet ist, nämlich der sogenannten Drehwage. Dieselbe besteht im Wesentlichen aus einem feinen, durch ein Gewicht in verticaler Richtung gespannten Metalldraht mit einem Bügel a, in dem horizontal ein Magnetstäbchen liegt. Der Draht ist oben um eine horizontale Axe gewickelt, durch deren Drehung das Stäbchen gehoben und gesenkt werden kann. Der verticale Cylinder, in welchem der Faden herabhängt, trägt oben eine kreisförmige, in der Mitte durchbrochene Platte, auf welcher eine zweite Platte mit sanfter Reibung drehbar ist. Die letztere hat eine dreieckige Oeffnung



Digitized by Google

von der Art, daß die eine Ecke derſelben im Mittelpunkte dieſer Platte liegt. In dieſem Eckpunkte nun hängt der Metallfaden herab, welcher auch durch den Mittelpunkt einer Theilung geht, die ſich am Umfange des Kaſtens auf einem Papierſtreifen befindet. Dieſelbe Platte trägt einen Zeiger, welcher die Größe der ſtattgehabten Drehung auf dem in Grade getheilten Umfange der erſten Platte angiebt.

Um die Gleichgewichtslage des Fadens zu beſtimmen, bringt man zunächſt einen unmagnetiſchen Stab in den Bügel und dreht dann die letzt erwähnte Platte ſo lange, bis der Stab genau in den magnetiſchen Meridian zu liegen kommt. Legt man nun den Magnetſtab in den Bügel und dreht die Platte von Neuem, ſo wird der Metallfaden ſeiner ganzen Länge nach eine Windung (Torſion) erleiden, vermöge deren er wieder in ſeine Gleichgewichtslage zurückzukehren ſtrebt. Da aber auch gleichzeitig der Erdmagnetismus auf den Stab wirkt, ſo muß dieſer eine Mittellage annehmen, welche natürlich von dem Verhältniß des Erdmagnetismus zur Torſionskraft des Fadens abhängt. Iſt die Platte um V Grad gedreht und dadurch die Magnetnadel um v Grade aus dem magnetiſchen Meridian abgelenkt worden, ſo beträgt die Windung oder Torſion des Fadens V — v. Dividirt man dieſe Größe durch den Ablenkungswinkel v, ſo giebt der Quotient $\frac{V-v}{v}$ an, wie viel Grade die Torſion des Fadens betragen muß, um die Nadel um 1° aus dem magnetiſchen Meridian abgelenkt zu erhalten. Iſt z. B. V = 300°, v = 10°, ſo iſt V — v = 290° und daher $\frac{V-v}{v}$ = 29°. In dieſem Falle iſt die Torſionskraft, welche dem Faden durch eine Drehung von 29° ertheilt wird, im Stande, der Kraft das Gleichgewicht zu halten, womit der Erdmagnetismus die Nadel in den magnetiſchen Meridian zurückzubringen ſtrebt, wenn ſie mit dieſem einen Winkel von 1° macht. Je ſtärker der eigene Magnetismus der Nadel iſt, eine deſto größere Drehung muß dem Faden gegeben werden, damit ſeine Torſionskraft dem Erdmagnetismus das Gleichgewicht halten kann oder damit er die Nadel um 1° vom magnetiſchen Meridian abgelenkt erhalte.

Coulomb wandte nun eine Magnetnadel an, die 24 Zoll Länge und ½—1 Linie Durchmeſſer hatte. Der Faden brauchte eine Windung von 35°, um eine ſolche Nadel um 1° vom magnetiſchen Meridian abzulenken. Alsdann wurde von oben in verticaler Richtung ein Magnetſtab ſo in den Kaſten geſteckt, daß der untere Pol des Stabes den zunächſt liegenden Pol der Nadel abſtoßen mußte. Der

Digitized by Google

Abſtoßungswinkel betrug 24°, d. h. die horizontale Nadel kam in einer Lage zur Ruhe, welche einen Winkel von 24° mit dem magnetiſchen Meridian machte. Die Torſion des Fadens beträgt alſo in dieſem Falle 24°; dieſe Kraft und der Erdmagnetismus ſind es, welche die Nadel in den magnetiſchen Meridian zurückzuführen ſtreben. Weil aber die Nadel bei einer Windung des Drahtes von 35° durch die erdmagnetiſche Kraft bis auf 1° Ablenkung vom magnetiſchen Meridian zurückgeführt wird und demnach die Kraft des Erdmagnetismus für jeden Grad Ablenkung einer Torſionskraft von 35° entſpricht, ſo iſt jene Kraft bei einer Ablenkung von 24° offenbar gleich 24. 35 — 840°. Die Abweichung von 24° entſpricht alſo im Ganzen einer Torſionskraft von 840 + 24 — 864°. Der Erdmagnetismus und eine Windung des Fadens von 24° ſuchen alſo die horizontale Nadel mit einer Torſionskraft von 864° in den magnetiſchen Meridian zurückzubringen. Mit dieſer Kraft ſtehen die abſtoßenden Kräfte der beiden Magnetpole im Gleichgewichte.

Jetzt wurde dem Faden eine Windung von drei vollen Kreisumfängen, alſo von 3. 360 — 1080° gegeben, ſo daß durch dieſe Drehung die horizontale Nadel dem unteren Pole des verticalen Magneten näher kam. Die Ablenkung der Nadel betrug nunmehr noch 17°. Die wirkliche Torſionskraft des Fadens war 1080 + 17 — 1097° und die einer Ablenkung von 17° entſprechende Kraft des Erdmagnetismus 17. 35 — 595°. Für die abſtoßende Kraft der beiden Pole hat man mithin 1097 + 595 — 1692°. Die abſtoßende Kraft im vorigen Falle verhält ſich alſo zu derjenigen im zweiten, ſo eben betrachteten wie 864 : 1692 oder nahe wie 1 : 2, während ſich die Quadrate der entſprechenden Entfernungen wie 24^2 : 17^2 oder ſehr nahe wie 2 : 1 verhalten. Die abſtoßenden Kräfte ſtehen alſo wirklich im umgekehrten Verhältniß der Quadrate der Entfernungen zu einander, was auch von der Anziehung der beiden Pole gilt.

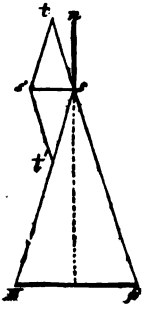
168. Nach dieſem Geſetze richtet ſich im Grunde nur die Anziehung und Abſtoßung der magnetiſchen Elemente, über die Geſammtwirkung eines Magneten auf den Pol eines anderen giebt es keine Auskunft. In den vorigen Verſuchen war die Einrichtung ſo getroffen, daß nur der eine Pol des zu unterſuchenden Magneten auf den zugewandten Pol des anderen eine bedeutende Wirkung üben konnte. Nach den Unterſuchungen von Gauß verhält ſich die Totalwirkung eines Magneten auf den Pol eines anderen wie die dritte Potenz der Entfernung. Dieſes Geſetz iſt aber nur eine nothwendige Folge des obigen,

Digitized by Google

daß sich nämlich die Wirkungen der magnetischen Elemente umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen verhalten. Gauß ging bei seinen Untersuchungen von ganz allgemeinen Principien aus, indem er annahm, daß die Wirkung der magnetischen Elemente bei einer beliebigen Lage der beiden Magnete zu einander im umgekehrten Verhältniß der nten Potenz der Entfernung stehe. Wir wollen hier zwei besondere Lagen, welche namentlich für die Versuche von Wichtigkeit sind, in Betracht ziehen und zugleich annehmen, daß die Entfernung der Magnete von einander ihre Dimensionen um ein Bedeutendes übertreffe, weil nur in diesem Falle das Gesetz von der Abnahme der Gesammtwirkung mit dem Cubus der Entfernung rein hervortritt.

Im ersten Falle mag der feste Magnetstab NS gegen die bewegliche Nadel ns eine Lage haben, wie die Figur zeigt. Die Nadel befindet sich nämlich in einer Ebene dergestalt, daß ihre Richtung auf der Richtung des Stabes NS rechtwinklig ist und durch dessen Mitte geht. Der Pol S stößt den Pol s in der Richtung s t ab, während ihn der Pol N in der Richtung s t' anzieht; beide Wirkungen suchen der Nadel ns eine Lage zu geben, welche der Richtung von NS parallel ist. Die Kraft, womit der Pol N oder S auf den Pol s wirkt, sei in der Entfernung 1 gleich k; dann läßt sich diese Kraft in der Entfernung s S = r durch $\frac{k}{r^n}$ ausdrücken, wo n vorläufig eine noch ganz

1.

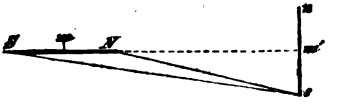


unbestimmte Größe ist. Die Kräfte, mit denen die Pole N und S auf den Pol s wirken, kann man der Größe und Richtung nach durch die Linien st' und s t darstellen. Construirt man nun das Parallelogramm der Kräfte, so ergiebt sich s s' als Resultirende der beiden Kräfte s t und s t', und man hat, weil die Dreiecke N s S und s t s' einander ähnlich sind, die Proportion Ss : SN = st : ss' oder, wenn man SN = 2a setzt und bedenkt, daß $st = \frac{k}{r^n}$ und Ss = r ist, $r : 2a = \frac{k}{r^n} : ss'$, woraus $ss' = \frac{2ak}{r^{n+1}}$ folgt. Das Product 2a.k läßt sich als das Drehungsmoment betrachten, womit der Stab NS in der Entfernung 1 auf die Nadel ns wirkt. Bezeichnen wir dasselbe durch M und ss' durch p, so haben wir $p = \frac{M}{r^{n+1}}$ für die Totalwirkung des Stabes auf die Nadel.

Digitized by Google

Betrachten wir nun den Fall, wo die Mitte der beweglichen Nadel in die Verlängerung des Stabes NS zu liegen kommt. Die Kraft, mit welcher der Pol N oder S in der Entfernung 1 auf den Pol s wirkt, sei wieder gleich k, dann ist die anziehende Kraft des

2.



Poles N auf den Pol s in der Entfernung r gleich $\frac{k}{(r-a)^n}$, wenn ms = mm′ = r und mN = a ist, und die Kraft, mit welcher S den Pol s abstößt, gleich $\frac{k}{(r+a)^n}$.

Da wir angenommen haben, daß ns nur klein in Beziehung auf die Entfernung beider Magnete ist, so lassen sich füglich die Richtungen der beiden so eben angeführten Kräfte als gleich und senkrecht auf ns betrachten. Die Gesammtwirkung von NS auf den Pol s ist also

$$P = \frac{k}{(r-a)^n} - \frac{k}{(r+a)^n} = k[(r-a)^{-n} - (r+a)^{-n}].$$

Entwickelt man die beiden eingeschlossenen Potenzen nach dem binomischen Lehrsatze, so erhält man

$$P = k[r^{-n} + nr^{-(n+1)}a + \ldots. - r^{-n} + nr^{-(n+1)}a - \ldots.]$$

oder wenn man noch etwas weiter entwickelt und reducirt,

$$P = 2knr^{-(n+1)}a - \frac{2kn(n+1)(n+2)r^{-(n+3)}a^3}{2 \cdot 3} - \ldots.$$

Werden nun alle folgenden Glieder gegen das erste vernachlässigt, so bleibt

$$P = \frac{2akn}{r^{n+1}} = \frac{nM}{r^{n+1}}$$

für die Gesammtwirkung des Magneten NS auf den einen Pol s der Nadel ns.

Ist nun wirklich n = 2, so haben wir im ersten Fall $p = \frac{M}{r^3}$ und im zweiten $P = \frac{2M}{r^3}$, also das Gesetz, daß die Totalwirkung eines Magneten auf den Pol eines anderen im umgekehrten Verhältniß mit der dritten Potenz der Entfernung steht. Um dies zu bewahrheiten, stellte Gauß nachfolgende Versuche an. Er brachte südlich von dem Stabe seines Magnetometers einen andern Magnetstab so an, daß beide zu einander eine Lage hatten, wie in Figur 1 die Magnete NS und ns. Die Ablenkung, welche der Magnetstab am Magnetometer hervorbrachte, war nur klein, so daß man füglich die Größe des Ablenkungswinkels als Maß der ablenkenden Kraft des Magneten NS betrachten konnte. Der einer bestimmten Entfernung entsprechende Werth des Ablenkungswinkels v wurde als Mittel aus vier Beobach-

Digitized by Google

tungen bestimmt. Wenn der Stab NS zu dem Magnetometerstabe eine Lage hatte, wie Fig. 1, so geschah die Ablenkung des Poles s gegen die Linke. Hierauf wurde der Stab NS umgekehrt, so daß S an die Stelle von N und der letztere Pol an die Stelle des ersteren kam. Der Pol s wurde nun eben so stark nach der Rechten hin abgelenkt. Alsdann wurde der Stab in derselben Entfernung und auf dieselbe Weise wie vorher auf der nördlichen Stelle des Magnetometers angebracht, um wieder eine östliche und westliche Ablenkung des letzteren zu beobachten. Aus diesen vier Beobachtungen wurde zur Bestimmung des Werthes von v das Mittel genommen und dann dieselbe Beobachtungsweise für verschiedene Entfernungen des Magnetstabes wiederholt.

Bei einer zweiten Reihe von Versuchen wurde dem Ablenkungsstabe eine solche Lage gegen den Magnetometerstab gegeben, wie in Fig. 2. Nachdem die Ablenkung v′ des letzteren, welche in diesem Falle eine westliche ist, beobachtet war, wurde der Stab NS umgekehrt, nämlich N an die Stelle von S und S an die Stelle von N gebracht. Die nun erfolgende östliche Ablenkung wurde notirt und dann der Stab eben so weit ostwärts vom Magneten gebracht, um auch hier eine westliche und östliche Ablenkung zu beobachten. Das Mittel aus diesen vier Beobachtungen gab den genauen Werth des Ablenkungswinkels v′. Auch diese Beobachtungen wurden für verschiedene Entfernungen der beiden Magnete wiederholt. Folgende Tabelle enthält die Resultate dieser Versuche; r bezeichnet die jedesmalige Entfernung der Aufhängeaxe des Magnetometerstabes vom Mittelpunkte des Stabes NS, v die entsprechende Ablenkung bei der ersten Versuchsreihe, v′ die entsprechende Ablenkung bei der zweiten Versuchsreihe.

r	v	v′
1,3 m	1° 10′ 19,3″	2° 13′ 51,2″
1,4	0 55 58,9	1 47 28,6
1,5	0 45 14,3	1 27 19,1
1,6	0 37 12,2	1 12 7,6
1,7	0 30 57,9	1 0 9,9
1,8	0 25 59,5	0 50 52,5
1,9	0 22 9,2	0 43 21,8
2,0	0 19 1,6	0 37 16,2
2,1	0 16 24,7	0 32 4,6
2,5	0 9 36,1	0 18 51,9
3,0	0 5 33,7	0 11 0,7
3,5	0 3 28,9	0 6 56,9
4,0	0 2 22,2	0 4 35,9

Digitized by Google

Vergleicht man für größere Entfernungen die Zahlen der zweiten Columne und ebenso die der dritten mit einander, so bemerkt man leicht, daß sich dieselben sehr nahe umgekehrt verhalten wie die dritten Potenzen der entsprechenden Werthe von r. Es ist demnach in den Formeln $p = \frac{M}{r^{n+1}}$ und $P = \frac{2M}{r^{n+1}}$ wirklich $n + 1 = 3$ und also auch $n = 2$, so daß man ohne Zweifel hat $p = \frac{M}{r^3}$ und $P = \frac{2M}{r^3}$. Demnach ist auch $P = 2p$, wovon man sich gleichfalls durch die Tabelle überzeugt, denn die Zahlen der dritten Columne, welche den Werthen von P entsprechen, sind nahe doppelt so groß, als die daneben stehenden Zahlen der zweiten Columne.

Die oben besprochenen Versuche lassen sich nach Weber auch ohne das Gaußische Magnetometer vermittelst einer gewöhnlichen Bousole, die in ganze Grade getheilt ist, anstellen. Als Ablenkungsstab dient ein 1 Decimeter langes, prismatisches Magnetstäbchen, welches nebst der Bousole auf einen 1—1,6 Meter langen, in Decimeter getheilten Maßstab gelegt wird. Die Bousole wird auf die Mitte des letzteren gestellt, dem man eine horizontale und vorerst zum magnetischen Meridian senkrechte Lage giebt. Das Magnetstäbchen wird dabei parallel mit dem Maßstabe auf den letzteren gelegt und die Ablenkung der Nadel in der Bousole, sowie die Entfernung der Mitte des Stäbchens von ihr genau notirt. Auch hier bestimmt man den Ablenkungswinkel als Mittel aus vier Versuchen auf die oben angegebene Weise. Alsdann legt man den Maßstab in die Richtung des magnetischen Meridians und das Ablenkungsstäbchen rechtwinklig auf denselben. Die Versuche werden wie vorher angestellt und für verschiedene Entfernungen wiederholt. Man erhält dann im Ganzen die oben angeführten Resultate. *)

Dieser Apparat ist auch auf Reisen zu Intensitätsbestimmungen des Erdmagnetismus geeignet, wozu er auch zunächst von Weber empfohlen wurde.

169. Eine Magnetnadel, welche in einer horizontalen Ebene um eine verticale Axe beweglich ist, steht bekanntlich nur unter dem Einflusse des horizontalen Antheils des Erdmagnetismus; von diesem erhält sie ihre Richtung. Wenn man eine solche Declinationsnadel aus ihrer Ruhelage entfernt, so macht sie vermöge der horizontalen Componente der erdmagnetischen Kraft Schwingungen wie ein Pendel.

*) Pouillet-Müller's Physik, 2. Band, Seite 42.

Digitized by Google

Die Schwingungsdauer eines einfachen Pendels wird bekanntlich durch $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ ausgedrückt, wo l die Länge des Pendels und g die Intensität der Schwere ist. Bezeichnet aber K das Trägheitsmoment und M das statische Moment eines zusammengesetzten Pendels, so hat man (nach Seite 90) $l = \frac{K}{M}$ und daher auch $t = \pi \sqrt{\frac{K}{gM}}$. Diese Formel paßt nun ganz für die kleine Schwingungsdauer einer Declinationsnadel, wenn man sich unter K das Trägheitsmoment der Nadel und unter M ihr magnetisches Drehungsmoment denkt; nur muß man an die Stelle von g die horizontale Intensität T des Erdmagnetismus setzen. Daher hat man $t = \pi \sqrt{\frac{K}{TM}}$ und hieraus $TM = \frac{\pi^2 K}{t^2}$. Nach dieser Formel läßt sich das Product TM leicht berechnen, wenn K und t gegeben sind. Der Werth von T kann aber vermittelst dieser Formel noch nicht ganz durch ein absolutes Maß ausgedrückt werden, weil M von der Natur der Nadel abhängig ist; das Drehungsmoment der Nadel ist größer oder kleiner, je nachdem ihr magnetischer Zustand mehr oder weniger ausgeprägt ist. Um nun die Intensität T des Erdmagnetismus mit einer für die Praxis hinreichenden Genauigkeit auf ein absolutes Maß zurückzuführen, dient folgende einfache Betrachtung.

Eine Declinationsnadel werde durch einen Magnetstab NS, dessen Entfernung sehr groß im Vergleich zu den Dimensionen der Nadel ist, aus ihrer Gleichgewichtslage ns entfernt, so daß sie nunmehr die Lage n′s′ annehmen mag. Die Wirkung, welche der Stab auf den Pol n der Nadel ns ausübt, läßt sich als senkrecht auf die Richtung der letzteren ansehen; der horizontale Antheil des Erdmagnetismus aber wirkt parallel mit der Richtung ns, indem er die Nadel in die anfängliche Gleichgewichtslage zurückzuführen strebt. Aus dem Parallelogramm dieser Kräfte ergiebt sich die Resultirende n′c, deren Richtung keine andere als die von n′s′, d. h. die Richtung der neuen Gleichgewichtslage der Nadel sein kann. Bezeichnet man den Ablenkungswinkel nmn′ oder bn′c durch v, so hat man $\text{tang. } v = \frac{bc}{bn'} = \frac{P}{T}$. Zufolge des vorhergehenden §. ist aber $P = \frac{2M}{r^3}$, daher auch $\text{tang. } v = \frac{2M}{Tr^3}$

Digitized by Google

und hieraus $\frac{M}{T} = \frac{1}{2} r^3 \text{ tang. } v$ für das Verhältniß des magnetiſchen Momentes des Stabes NS zur horizontalen Intenſität des Erdmagnetismus. Dividirt man dieſen Ausdruck in den obigen $MT = \frac{\pi^2 K}{t^2}$, ſo erhält man $T^2 = \frac{2\pi^2 K}{r^3 t^2 \text{ tang. } v}$ und $T = \frac{\pi}{t}\sqrt{\frac{2K}{r^3 \text{ tang. } v}}$.

Weber wandte bei einem Verſuche dieſer Art ein parallelopipediſches Stäbchen an, das von einer Papierhülſe getragen wurde. Iſt die Länge und Breite eines ſolchen Stäbchens beziehungsweiſe a und b Millimeter und ſein Gewicht gleich p Milligramm, ſo iſt deſſen Trägheitsmoment $K = \frac{a^2 + b^2}{12} . p$. Dieſen Werth müßte man alſo für K in obige Formel ſubſtituiren, um den Werth von T in abſolutem Maße zu erhalten.

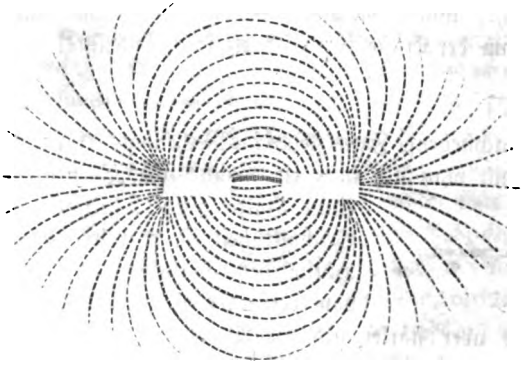
Kennt man einmal die horizontale Intenſität des Erdmagnetismus, ſo ergiebt ſich daraus leicht die Totalkraft deſſelben. Denn iſt i die Inclination oder der Winkel, welchen die Magnetnadel mit dem Horizont macht, und J die totale Intenſität, ſo hat man nach dem Parallelogramm der Kräfte für die horizontale Intenſität $T = J . \cos i$, alſo $J = \frac{T}{\cos i}$.

170. Nachſtehende Figur ſtelle eine Reihe magnetiſcher Maſſentheilchen dar. Denkt man ſich in x ein magnetiſches Element, das mit der einen Hälfte jener Theilchen von gleicher Beſchaffenheit iſt, ſo wird es von der einen Hälfte des Theilchens 1 angezogen und von der anderen Hälfte abgeſtoßen. Die Anziehung iſt aber ſtärker als die Abſtoßung, weil die anziehende Hälfte des Maſſentheilchens 1 dem Punkte x näher liegt. Ganz auf dieſelbe Weiſe wirkt das Theilchen 2 auf das Element, nur daß dieſe Wirkung wegen der größeren Entfernung kleiner iſt. Noch ſchwächer, aber ebenſo wirken die Theilchen 3, 4, 5 ... Wird das Element nach dem Punkte y gebracht, ſo bemerkt man, daß ſich die Wirkung der Theilchen 1 und 2 auf y aufheben müſſen, daher bleibt nur noch die Wirkung der Theilchen 3, 4, 5, 6 übrig, welche aber begreiflich viel ſchwächer als die Geſammtwirkung im vorigen Fall ſein wird. Befindet ſich das Element in z, ſo heben ſich die Wirkungen von 1 und 2 gegen die von 3 und 4 auf und es bleibt nur noch die Wirkung von 5 und 6 übrig, welche jedenfalls wieder ſchwächer als die zuvor be-

Digitized by Google

trachtete ist. Auf diese Weise fortfahrend, sieht man, daß die Wirkung in der Mitte gleich Null sein muß.

Befände sich in x ein unmagnetisches Massentheilchen, so würde es durch den Einfluß der nahe liegenden magnetischen Theilchen polarisch werden; das eine Element desselben würde angezogen, das andere abgestoßen werden, so daß es eine Lage annehmen müßte, welche durch die Resultirende aller Einwirkungen bestimmt wäre. Weil nun die Wirkung gegen das Ende des Magneten hin am stärksten ist, so wird sich das Massentheilchen auch nach diesem Ende hin richten. Wenn man sich eine Menge solcher leicht beweglichen Theilchen um den Magneten denkt, so wird jedes gegen den letzteren eine bestimmte Lage annehmen müssen, welche der Richtung der Resultirenden aller magnetischen Einwirkungen entspricht. Die magnetisch gewordenen Theilchen hängen sich aneinander, in der Art, daß der — Pol des einen dem + Pol des anderen gegenüber liegt. Auf diese Weise entstehen die magnetischen Curven, die wir schon früher in Erwähnung gebracht haben; man erhält sie, wenn man auf einen Magneten ein



Blatt Papier legt, das mit Eisenfeile bestreut ist. Die letztere ordnet sich dann, wie die Figur zeigt.

Coulomb hat das Gesetz, nach welchem die Stärke der magnetischen Wirkung von den Enden eines Magnetstabes gegen die Mitte hin abnimmt, vermittelst einer 1,5 Centimeter langen Nadel bestimmt. Dieselbe war an einem Seidenfaden aufgehängt und wurde dem vertical gestellten Magnetstabe genähert, nachdem zuvor ihre Schwingungsdauer unter dem alleinigen Einflusse des Erdmagnetismus bestimmt war. Als er darauf den Nordpol der Nadel dem Südpole des Stabes

Digitized by Google

näherte, wurden die Schwingungen der ersteren beschleunigt. Diese Beschleunigung fiel aber um so geringer aus, je näher die Nadel dem Mittelpunkte des Stabes kam, so daß in dem Falle, wo der Nordpol der Nadel der Mitte gerade gegenüber stand, die Zahl der Schwingungen nicht mehr betrug, als wenn die Nadel frei, d. h. nur unter dem Einflusse des Erdmagnetismus oscillirte. Bei Stäben von mehr als 7 Zoll Länge läßt sich dieses Gesetz durch eine Curve veranschaulichen, deren Abscissen die Entfernungen von den Enden der Nadel und deren Ordinaten die magnetische Kraft in jedem Punkte darstellen. Wenn solche längere Stäbe eine regelmäßige Gestalt haben und überdies ganz gleichförmig magnetisirt sind, so kann man die Angriffspunkte der Resultirenden aller magnetischen Kräfte oder die Pole durch Rechnung finden. Coulomb fand für Stäbe von mehr als 7 Zoll Länge, daß die Pole etwa 18 Linien weit von den Enden entfernt liegen. Bei kürzeren Stäben beträgt die Entfernung der Pole von den Enden $^1/_6$ der ganzen oder $^1/_3$ der halben Länge. Bei rautenförmigen, breiten Magnetnadeln liegen die Pole nicht weit von der Mitte. Ist der Magnet weder von regelmäßiger Gestalt, noch gleichmäßig magnetisirt, so können die Pole zwar nicht durch Rechnung, wohl aber leicht mit Hülfe einer kleinen an einem Seidenfaden hängenden Magnetnadel entdeckt werden.

Viertes Kapitel.

Von der Erregung des Magnetismus.

171. Eines der gewöhnlichsten und kräftigsten Mittel, dem Stahle Magnetismus zu ertheilen, ist das Streichen mit einem Magneten.

Beim einfachen oder getrennten Striche wird der Nordpol eines Magneten auf die Mitte des zu magnetisirenden Stahlstabes gesetzt und damit bis an das Ende oder noch etwas darüber hinaus gestrichen. Dies kann man etwa 40 bis 50 Mal wiederholen und dann auch eben so die andere Seite mit dem Südpole des Magneten behandeln. Wesentlich ist es aber, daß man immer nach derselben Richtung hinstreicht, weil sonst der schon erzeugte Magnetismus wieder zerstört werden würde. Das Ende, welches mit dem Nordpole gestrichen wurde, erhält dann den Südpol und das andere den Nordpol. Uebrigens kann man auch die entgegengesetzten Pole zweier Magnete auf die Mitte setzen, indem man den einen Magneten in die

Digitized by Google

rechte, den anderen in die linke Hand nimmt, und dann gleichzeitig den einen nach der rechten, den zweiten nach der linken Seite hin fortführen, so daß beide Magnete gleichzeitig an den entgegengesetzten Enden des Stabes ankommen. Hierauf setzt man die Magnete wieder in der Mitte auf und wiederholt das Streichen wie vorher nach entgegengesetzten Richtungen.

Der Doppelstrich besteht darin, daß man auf die Mitte des zu magnetisirenden Stabes die entgegengesetzten Pole zweier Magnete so aufstellt, daß sie mit der Horizontalen etwa einen Winkel von 15 bis 20 Grad machen. Hierauf bewegt man beide Pole nach demselben Ende hin und wieder zurück bis an's andere Ende, was man mehrmals wiederholt; zuletzt hebt man die beiden Magnete wieder von der Mitte des Stabes ab. Zwischen den unteren Enden der Strichmagnete muß sich ein kleiner Zwischenraum befinden, den man leicht durch ein Stückchen Holz oder Blei unveränderlich erhalten kann. Sowohl beim einfachen als beim doppelten Striche ist es vortheilhaft, wenn man den zu magnetisirenden Stahlstab auf die entgegengesetzten Enden zweier starken Magnete legt, welche den erregten Magnetismus festhalten und ein kräftigeres Einwirken des Streichmagneten zulassen.

Bei den erwähnten Arten des Magnetisirens entstehen zuweilen in dem Stahlstabe außer den Hauptpolen noch Zwischenpole oder sogenannte Folgepunkte, welche sich durch eine kleine Magnetnadel oder auch durch Eintauchen des Stabes in Eisenfeile auffinden lassen. Sie entstehen namentlich dann, wenn das Streichen ungleichmäßig geschieht oder wenn der Stab von ungleichförmiger Beschaffenheit ist. Ein derartiger Stab ist für manche Zwecke ganz unbrauchbar; bei Nadeln, welche zu Bouffolen verwendet werden sollen, dürfen solche Zwischenpole nicht vorkommen.

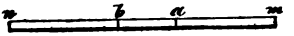
Beim Kreisstriche legt man 4 Stäbe in der Form eines Quadrates zusammen, setzt wie beim Doppelstriche zwei Magnete mit den ungleichnamigen Polen auf eine Stange und führt sie mehrmals in derselben Richtung rings herum.

Wenn man mehrere Magnetstäbe in einem kreisförmigen Ringe befestigt, so daß sie wie die Radien desselben gegen die Mitte zusammenlaufen und hier die ungleichnamigen Pole einander gegenüber stehen, so wird ein durch die Mitte gezogener Stahlstab in der Art magnetisirt, daß an ihm so viele Reihen von diametral gegenüber liegenden Polen entstehen, als Magnetstäbe angewendet wurden. Der Stab bildet so einen Transversalmagneten. —

Wenn man auf das eine Ende eines Stahlstabes den Nordpol

Digitized by Google

eines Magneten setzt, so entsteht hier ein Südpol und an dem anderen Ende n ein Nordpol. Geht man nun mit dem Magneten weiter gegen n hin, so wächst die magnetische Kraft von n bis zu einem gewissen Punkte a, von wo sie wieder abnimmt.



Diesen Punkt nennt man den Culminationspunkt. Wenn man den Magneten noch weiter fortrückt, so wird nach einiger Zeit der Magnetismus von n gleich Null; es geschieht dies in einem Punkte b, der in der Nähe der Mitte liegt und Indifferenzpunkt genannt wird. Dasselbe findet sich in Beziehung auf m, wenn man mit dem Magneten von n ausgeht. Diese Beobachtungen wurden zuerst von Brugmann angestellt. —

Häufig giebt man den Magneten die Form eines Hufeisens. Ein hufeisenförmiger Stahlstab kann gleichfalls nach den obigen Methoden magnetisirt werden. Man legt das eine Ende auf den Nordpol eines starken Magneten, das andere auf den Südpol eines zweiten und wendet dann die Methode des Doppelstriches an, indem man von der Mitte der Krümmung ausgeht. Auch ein Hufeisenmagnet läßt sich zur Erzeugung des Magnetismus in einem hufeisenförmigen Stabe zweckmäßig gebrauchen. Man verbindet dabei nach Hoffer die beiden Enden des letzteren Stabes durch ein vorgelegtes weiches Eisen, den sogenannten Anker, setzt den Streichmagneten so nahe als möglich am Anker und in aufrechter Stellung auf die Schenkel des Stabes und führt ihn gleichförmig und parallel mit sich selbst über die Wölbung hinaus. Dieses Verfahren wird mehrmals wiederholt. Jeder Schenkel erhält dann einen Pol, der mit dem aufgesetzten Pole des Streichmagneten gleichnamig ist. Man kann auch die Schenkel des Streichmagneten auf die Wölbung setzen und nach den Enden des Stabes hinführen. Diese Methode ist jedoch weniger wirksam als die vorige; bei ihr sind die entstandenen Pole den berührenden Polen des Streichmagneten entgegengesetzt. Den nach der ersten Methode erregten Magnetismus kann man durch die zweite aufheben und durch längeres Streichen selbst die Pole umkehren.

172. Die Stärke des Magnetismus, welche nach den angeführten Methoden dem Stahle mitgetheilt werden kann, richtet sich sowohl nach der Stärke des Streichmagneten als auch nach der Größe und sonstigen Beschaffenheit des Stabes. Für jeden Stab giebt es eine Grenze, über welche hinaus er nicht stärker magnetisirt werden kann. Diese Grenze nennt man den Sättigungspunkt, welcher am sichersten dadurch entdeckt wird, daß man den Stab mit stärkeren

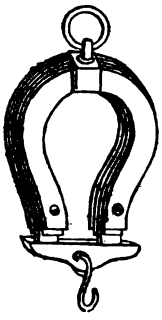
Digitized by Google

Magneten in demſelben Sinne wiederholt magnetiſirt; er iſt geſättigt, wenn man ihm auf dieſe Weiſe keinen ſtärkeren, bleibenden Magnetismus beibringen kann. Stahlſtäbe, welche man zu brauchbaren Magneten verwenden will, müſſen feinkörnig und gleichförmig hart ſein. Man kann dem Stahle den höchſten Härtegrad ertheilen, wenn man ihn hell rothglühend macht und raſch in kaltem Waſſer oder Queckſilber ablöſcht. Solcher Stahl iſt zwar weniger empfänglich für die Einwirkung des Streichmagneten, nimmt aber allmälig einen ſtarken und ſehr andauernden Magnetismus an; nur iſt bei ihm der Uebelſtand vorhanden, daß er ſehr zerbrechlich iſt und leicht Folgepunkte in ihm entſtehen. Man zieht deshalb zur Anfertigung von Magnetnadeln den angelaſſenen Stahl vor, welcher entſteht, wenn man den glasharten Stahl über Kohlenfeuer langſam erwärmt; er verliert dabei ſeine anfängliche Härte und Sprödigkeit und nimmt auf ſeiner Oberfläche mit wachſender Temperatur eine Reihe ſchöner Farben an. Die ſogenannte Waſſerfarbe des Stahles entſpricht einer Temperatur von 450°. Verſuchen zufolge iſt Stahl, welcher bis zur blauen und ſelbſt bis zur Waſſerfarbe angelaſſen iſt, zu künſtlichen Magneten ſehr geeignet.

173. Man kann den durch Streichen erregten Magnetismus auf längere Zeit fixiren, wenn man Stücke von weichem Eiſen mit dem künſtlichen Magnetſtabe in Berührung bringt; dieſe werden dann ſelbſt magnetiſch und wirken auf den Magnetismus des Stabes zurück, wodurch eine ſtärkere Vertheilung deſſelben herbeigeführt wird. Man macht hierbei die Polenden gewöhnlich durch Schleifen eben, belegt ſie mit dünnen Eiſenplatten, die ſich nach unten in ſtarke Eiſenfüße endigen, und befeſtigt die ganze Belegung durch eine Kappe von Meſſing oder Leder. Die Füße werden durch einen Eiſenſtab, der in der Mitte mit einem Haken zur Aufnahme von Gewichten verſehen iſt, mit einander verbunden. Einen ſo behandelten Magneten nennt man armirt.

Selbſt ſchwache Magnetſtäbe können zu einem ſehr wirkſamen Magneten mit einander vereiniget werden, wenn man ſie mit ihren gleichnamigen Polen an einander legt. Ein ſolches Bündel läßt ſich auch mit Vortheil als Streichmagnet benutzen. Die Verbindung mehrerer Magnetſtäbe nennt man überhaupt ein magnetiſches Magazin. Coulomb conſtruirte ein ſolches aus 12 Stäben, die 3 Schichten, jede zu 4 Stäben, bildeten. Die Stäbe ſind in Eiſenſtücke befeſtigt, welche als Armatur dienen und nebſt jenen durch Meſſingbänder zuſammengehalten werden. Wenn man mehrere Hufeiſenmagnete

Digitized by Google



mit einander verbinden will, so nimmt man eine ungerade Anzahl von Stäben, unter denen der mittlere der längste ist, während die übrigen auf beiden Seiten stufenweise abnehmen. Hufeisenmagnete zeichnen sich vor den anderen durch eine stärkere Tragkraft aus; sie können das 10- bis 20fache ihres Gewichtes tragen.

Wir haben schon früher bemerkt, daß die Magnete durch allmälige Vermehrung des Gewichtes, welches sie tragen, verstärkt werden können. Werden sie aber überladen, wodurch der Anker plötzlich abreißt, so verlieren sie aus bereits angeführten Gründen bedeutend an Stärke.

174. Die Wärme hat einen wesentlichen Einfluß auf den Magnetismus. Wenn man den Magneten roth- oder weißglühend macht, so verliert er seinen magnetischen Zustand vollständig, indem er auf einen anderen Magneten oder auf Eisen nicht die geringste Wirkung mehr äußert. Auch glühendes Eisen wird von einem Magneten nicht mehr angezogen. Die Stärke des Magnetismus nimmt allmälig ab, so wie die Temperatur steigt. Auch hat Kupffer entdeckt, daß man einen Magneten längere Zeit einer bestimmten Temperatur aussetzen muß, um allen Magnetismus zu verlieren, dessen er bei dieser Temperatur überhaupt verlustig werden kann. Für alle des Magnetismus fähigen Körper hat sich eine gewisse Temperaturgrenze herausgestellt, oberhalb deren sie keine magnetische Wirkung mehr äußern. Bei Kobalt liegt diese Temperatur weit über der Weißglühhitze, für Nickel etwa bei 350°, für Braunstein bei 20—25° und für Chrom unter der Temperatur des Rothglühens. Die genannten Körper verlieren den Magnetismus in den meisten ihrer chemischen Verbindungen vollständig, was bei Eisen nicht der Fall ist; sie sind außer dem letzteren die einzigen Körper, welche im eigentlichen Sinne magnetisch werden können.

Die Schwächung, welche der Magnetismus durch die Wärme erleidet, läßt sich am besten durch die Veränderung der Ablenkung beobachten, welche ein der Temperaturveränderung ausgesetzter Magnet an einem anderen frei aufgehängten hervorbringt.

Durch plötzliche Abnahme der Wärme wird ein Eisenstab magnetisch; man überzeugt sich davon, wenn man ihn, nachdem er rothglühend gemacht worden, in lothrechter Stellung in Wasser taucht. Er erhält dann an seinem unteren Ende einen Nordpol, an seinem oberen

Digitized by Google

einen Südpol. Wenn man einen Eisenstab während des Streichens rothglühend erhält und dann schnell abkühlt, so soll der erzeugte Magnetismus bedeutend stärker sein, als wenn man den Stab auf gewöhnliche Weise magnetisirt hätte. Es scheint daher, als ob durch die Wärme die Empfänglichkeit des Eisens für den Magnetismus erhöht würde, während die vorhandene magnetische Kraft darunter leidet. Es ist dies natürlich. Wenn die Temperatur des Eisens bis zu einem gewissen Grade erhöht wird, so werden die Molecüle gegen äußere Einflüsse nachgiebiger, ihre Elemente sind eher fähig, diejenige Stellung oder Richtung anzunehmen, bei welcher der Magnetismus zu Tage tritt. Durch plötzliche Abkühlung wird diese Stellung fixirt, namentlich wenn während der Ablöschung des Eisens der magnetische Einfluß noch andauert. Umgekehrt verhält es sich, wenn ein Magnet allmälig erwärmt wird; die Spannung zwischen den Elementen der polarisirten Molecüle wird dadurch vermindert, indem sie in die gewöhnliche Lage, wo sie ohne Magnetismus sind, zurückstreben. Eben so bringen auch Stoßen, Schlagen, Winden u. dergl. je nach den Umständen entgegengesetzte Wirkungen hervor. Wenn ein Stab einem magnetischen Einflusse ausgesetzt ist, so sucht der letztere den Massentheilchen des ersteren die dem Magnetismus entsprechende Richtung zu ertheilen, was durch eine Erschütterung der Massentheilchen begünstigt werden kann. Da aber die Elemente der polarisirten Molecüle stets in die gewöhnliche Lage zurückzukehren streben, so sieht man leicht, wie diesem Streben eine Erschütterung der Molecüle zu Hülfe kommen kann, sofern nicht die erregende Ursache mit hinreichender Stärke fortwirkt.

175. Morichini brachte Stahlnadeln, welche vermittelst Glashütchen auf Spitzen leicht beweglich waren, in den violeten Theil des Sonnenspectrums und fand, daß sie dadurch magnetisch wurden. Dasselbe leisteten auch die blauen und grünen, nicht aber die übrigen Sonnenstrahlen. Noch besser gelang der Versuch, wenn die genannten Strahlen durch eine Linse concentrirt wurden. Später stellte Mary Sommerville hierüber Versuche mit Nähnadeln und blauen Bändern an. Die eine Hälfte der Nadeln wurde mit den letzteren umwickelt und die andere Hälfte mit einem Papier bedeckt. Wenn nun die Nadel einen Tag lang bei heiterem Wetter in der Sonne gelegen hatte, so zeigte sie sich magnetisch. Auf diese Weise wurde Uhrfedern von 1—1½ Zoll Länge Magnetismus ertheilt. Dasselbe Resultat ergiebt sich, wenn man die Nadeln zur Hälfte bedeckt unter ein mit Kobalt blau oder grün gefärbtes Glas bringt und dem Sonnenlichte aussetzt. Auch Stahlnadeln, welche an einem Ende polirt

Digitized by Google

sind, werden im Sonnenlichte magnetisch und zwar erhält das polirte Ende einen Nordpol. Christie glaubte ferner eine Veränderung des Magnetismus in schon magnetisirten Nadeln durch das Sonnenlicht wahrgenommen zu haben, da nach ihm eine Magnetnadel im Sonnenscheine früher zur Ruhe kam, als eine andere, die im Schatten oscillirte. Nach Versuchen von Baumgartner soll dies jedoch nur von Strömungen und Wirbeln herrühren, welche durch Erwärmung von außen in der Luft des Gehäuses, worin sich die Magnetnadel befindet, hervorgebracht werden.

Manche suchen die obigen Erscheinungen auf eine Einwirkung des Erdmagnetismus und der Wärme zurückzuführen. Rieß und Moser kamen nach äußerst sorgfältig angestellten Untersuchungen zu dem Resultate, daß der behauptete Einfluß des Sonnenlichtes lediglich seinen Grund in den Methoden habe, welche zur Prüfung desselben angewendet worden seien. Ueberhaupt folgt wohl aus dem Obigen nur so viel, daß das Sonnenlicht unter Umständen das Entstehen des Magnetismus begünstigt, nicht aber im Mindesten, daß es selbst magnetischer Natur sei.

Digitized by Google

Vierter Abschnitt.

Von der Elektricität und den damit zusammenhängenden Erscheinungen.

Erstes Kapitel.

Von den elektrischen Erscheinungen überhaupt.

176. Wenn man eine Stange von Glas, Schwefel oder Siegellack mit Wollen- oder Seidenzeug reibt, so erlangt sie die Eigenschaft, leichte Körper, wie Papierschnitzel, Goldflitter, Sägespähne, Kügelchen von Hollundermark u. s. w. anzuziehen und darauf wieder abzustoßen. Man beobachtete diese Erscheinung zuerst am Bernstein (ἤλεκτρον) und nannte sie deshalb elektrische, die Ursache selbst aber Elektricität.

Aus dem Vorbemerkten sieht man schon, wie sich die elektrische Anziehung von der magnetischen unterscheidet. Bei der ersteren tritt auf die Anziehung eine Abstoßung ein, sobald eine Berührung der betreffenden Körper stattgefunden hat, bei letzterer aber nicht.

Wenn man ein Korkkügelchen oder Goldblättchen, das an einem Seidenfaden aufgehängt ist, einer geriebenen Glasröhre nahe bringt, so wird es dem Obigen gemäß zuerst angezogen und dann nach erfolgter Berührung abgestoßen. Das Korkkügelchen oder Goldblättchen ist nun selbst elektrisch und wird von der Glasröhre noch abgestoßen, wenn man es auch erst nach einiger Zeit wieder mit ihr in Berührung bringt. Hätte man aber das Korkkügelchen an einem leinenen Faden aufgehängt, so würde es alsbald den elektrischen Zustand verloren haben. Der letzterwähnte Faden leitet also den elektrischen Zustand fort, der Seidenfaden aber nicht. Dasselbe zeigt sich noch auffallender, wenn man einen an einem Seidenfaden hängenden Metalldraht

Digitized by Google

mit einem geriebenen Glasſtabe in Berührung bringt. Das Metall verräth dann an jedem Punkte ſeiner Oberfläche den elektriſchen Zuſtand, welcher ihm vom Glaſe an den berührten Stellen mitgetheilt wurde. Man ſieht alſo, daß Metalle die Eigenſchaft haben, den elektriſchen Zuſtand anzunehmen und ihn längs ihrer ganzen Oberfläche fortzupflanzen. Dagegen wird eine gewöhnliche Harz- oder Glasſtange durch Berührung mit einem elektriſchen Körper nicht allenthalben, ſondern höchſtens nur an der Berührungsſtelle ſelbſt ſchwach elektriſch. Wenn man ein durch Mittheilung elektriſch gewordenes Metall an irgend einer Stelle mit der Hand berührt, ſo verliert es ſeinen elektriſchen Zuſtand in der Regel an allen Stellen, während ein durch Reiben überall elektriſirter Glasſtab nur an der berührten Stelle einen ſolchen Verluſt erleidet. Auf Grund des Vorhergehenden nennt man die Metalle und alle Körper, welche ſich gegen die Elektricität auf ähnliche Weiſe wie jene verhalten, gute Leiter, Glas, Harz, Seide und alle ihnen in dieſer Hinſicht ähnliche Körper aber ſchlechte Leiter der Elektricität. Zwiſchen beiden ſtehen die ſogenannten Halbleiter, zu denen man Alabaſter, Marmor, die meiſten Erden und Steine rechnet. Zu den guten Leitern gehören außer den Metallen namentlich noch gebrannte Kohle, Erze, der menſchliche Körper und lebende Vegetabilien, die feuchte Erde, Waſſer und Waſſerdampf nebſt vielen anderen Flüſſigkeiten. Daher können auch Körper, welche ſonſt den elektriſchen Zuſtand ſchlecht fortpflanzen, gute Leiter werden, wenn ſich auf ihrer Oberfläche Waſſerdampf niederſchlägt. Wenn ein Leiter den ihm mitgetheilten elektriſchen Zuſtand auf längere Zeit behalten ſoll, ſo muß er iſolirt oder, was daſſelbe iſt, mit ſchlechten Leitern (Iſolatoren) umgeben werden. Auch die beſten Leiter können durch Reiben elektriſch gemacht werden, wenn man ſie hinlänglich iſolirt.

Um zu erfahren, ob ein Körper durch Reiben elektriſch geworden iſt, wendet man ſogenannte Elektroſkope an. Eines der einfachſten iſt ein kleines Kügelchen aus Hollundermark, welches an einem Seidenfaden aufgehängt iſt. Der zu prüfende Körper iſt elektriſch, ſobald er das angenäherte Kügelchen anzieht, im Gegentheil aber entweder gar nicht oder doch nur ſehr ſchwach. Ein zweites iſt die ſogenannte elektriſche Nadel. Dieſelbe beſteht aus einem Meſſingdraht, welcher in zwei metalliſchen Hohlkugeln endigt und in ſeiner Mitte vermittelſt eines Stahl- oder Achathütchens auf einer feinen Spitze ruht. Schon eine geringe elektriſche Kraft bringt dieſe Nadel in Bewegung. Wir werden bald noch andere Apparate dieſer Art kennen lernen.

Digitized by Google

Die Elektricität kann nicht allein bei unmittelbarer Berührung, sondern auch schon auf einige Entfernung hin von einem Körper zu einem anderen übergehen. Nähert man z. B. eine geriebene Glas- oder Siegellackstange einem Metallstabe oder dem Knöchel eines Fingers, so sieht man einen glänzenden Funken überspringen und hört zugleich ein knisterndes Geräusch. Die Elektricität geht um so leichter von einem Körper zu einem anderen über, je besser sie der letztere leitet und je größer dessen Oberfläche ist. Soll daher ein isolirter Leiter die ihm anhaftende Elektricität möglichst vollständig verlieren, so muß man ihn mit einem anderen Leiter von sehr bedeutender Oberfläche in Berührung bringen. Dies geschieht z. B. wenn man ihn mit dem Erdboden, also gewissermaßen mit der ganzen Erdoberfläche in leitende Verbindung setzt.

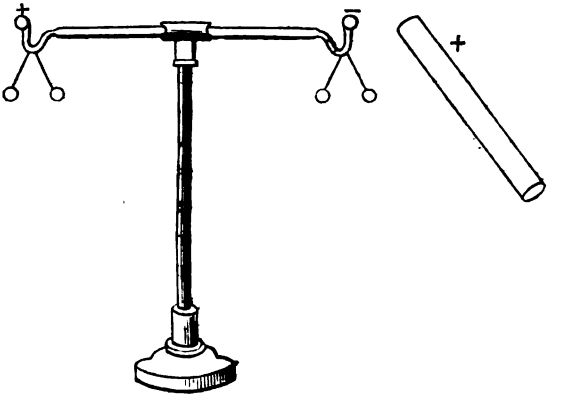
177. Wenn man zwei Korkkügelchen oder Goldblättchen, von denen jedes an einem Seidenfaden hängt, mit einem geriebenen Glasstabe in Berührung bringt, so stoßen sie sich ab, wenn sie einander genähert werden. Dasselbe beobachtet man, wenn sie durch eine geriebene Siegellackstange elektrisch gemacht werden. Wird aber das eine Kügelchen durch Glas, das andere durch Siegellack elektrisirt, so ziehen sie einander an. Nach erfolgter Berührung sind aber beide unelektrisch, sofern der elektrische Zustand vorher in beiden mit gleicher Stärke hervortrat. Man gewahrt also, daß der elektrische Zustand des Harzes von anderer Art ist, als derjenige des Glases und daß sich beide Zustände unter Umständen wie entgegengesetzte Größen ganz aufheben. Dies findet beim Magnetismus nicht in gleicher Weise statt, wiewohl auch bei ihm ein ähnlicher Gegensatz hinsichtlich der Wirkung vorkommt. Ein elektrischer Körper kann einem anderen den elektrischen Zustand durch Berührung mittheilen; dabei erleidet aber der erstere einen Verlust an Elektricität, welcher bis zur Erschöpfung gehen kann. Hier sieht man sich schon eher veranlaßt, ein wirkliches Fluidum anzunehmen, was von einem Körper zum anderen übergeht und die besagten Erscheinungen hervorbringt. Zwar theilt auch der Magnet seinen Zustand dem Eisen durch Berührung mit, aber er verliert dabei nichts, sondern kann im Gegentheil dadurch noch stärker werden. Dazu kommt noch, daß der elektrische Zustand in allen Körpern unzweideutig hervortreten kann, der magnetische aber nicht.

Nach dem Obigen haben **gleichartige** elektrische Zustände **Abstoßung**, **ungleichartige** hingegen **Anziehung** zur Folge. Wegen des Gegensatzes nun, welcher zwischen der Glas- und Harz-

Digitized by Google

elektricität besteht, nennt man die eine *positiv*, die andere *negativ* und bezeichnet die erstere durch +, die andere durch —.

178. In nachstehender Figur sieht man einen Metallstab, welcher auf einem isolirten Glasfuße ruht; die Enden sind hakenförmig umgebogen und tragen Korkkügelchen, welche an leitenden Metall- oder Leinenfäden befestigt sind. Nähert man nun dem Metallstabe eine geriebene Glasstange, so fahren die Korkkügelchen alsbald auseinander, indem die dem Glase zunächst hängenden mit negativer, die anderen mit positiver Elektricität geladen werden. Der Metallstab zeigt also an seinen beiden Enden entgegengesetzte elektrische Zustände. Ein elektrisirter Körper bringt demnach in einem isolirten Leiter eine ähnliche Vertheilung hervor, wie ein Magnet im weichen Eisen. Entfernt man den elektrischen Körper wieder, so fallen auch die Kügelchen wieder zusammen, der Körper kehrt in seinen gewöhnlichen Zustand zurück. Bringt man den isolirten Leiter, während noch der elektrische Körper auf ihn wirkt, mit dem Boden in leitende Verbindung, etwa vermittelst eines Metalldrahtes, so wird die von jenem Körper zurückgestoßene Elektricität in den Boden abgeführt und der Leiter befindet sich nun seiner ganzen Ausdehnung nach in demselben elektrischen Zustande. Auch hierdurch unterscheidet sich die Elektricität wesentlich vom Magnetismus.



179. Wiewohl die bisher angeführten Erscheinungen keinen strengen Beweis für die Existenz eines besonderen Fluidums liefern, so rufen sie doch die Vorstellung eines solchen mit Nothwendigkeit hervor und verleihen der Annahme desselben eine gewisse Wahrscheinlichkeit. Es ist die natürlichste Voraussetzung, die man zum Behufe der Erklärung elektrischer Erscheinungen machen kann, und wir müssen so lange daran festhalten, bis sie durch eine bessere ersetzt oder ihr Widerspruch mit feststehenden Thatsachen erwiesen ist. Wenn man bemerkt, wie dasjenige, was man Elektricität nennt, von Körper zu

Digitized by Google

Körper übergeht, wie es die Materie erschüttert und unter Umständen nach allen Richtungen zertrümmert, wie es doch auch selbst durch den leeren Raum seinen Weg nimmt, da ist es nicht leicht, sich eines besonderen Fluidums, welches die betreffenden Erscheinungen bedingt, gänzlich zu entschlagen.

Die Schnelligkeit, mit welcher sich die Elektricität in den Leitern verbreitet, deutet an, daß sie ein höchst bewegliches Fluidum sei, d. h. daß sich zwischen ihren eigenen Elementen sehr bald Repulsion einstellt, wenn sie nur einigermaßen in einem Körper angehäuft ist. Vergleichen wir die Wärme mit der Elektricität, so ergiebt sich, daß jene die Körper allmälig ausdehnt, während die letztere sie durch einen heftigen Schlag zerreißen und zerstäuben oder unter Umständen durch einen äußerst schnellen Strom zerlegen kann, wie wir später sehen werden. Die Wirkung der Wärme zeigt also im Allgemeinen mehr den Charakter der Stetigkeit als diejenige der Elektricität. Wir müssen hieraus schließen, daß die Anziehung zwischen dem Elektricum und den Molecülen der Materie schwächer, aber weniger ungleich ist, als zwischen diesen und dem Wärmeäther, so daß dort die Anzahl der Elemente, welche ein einziges Massentheilchen der Materie beharrlich mit sich vereinigen kann, viel kleiner ist als hier. Das Gleichgewicht der Attraction und Repulsion, welches zwischen einem Massentheilchen der Materie und einer gewissen Anzahl von Elementen des Elektricums besteht, kann daher viel eher durch Repulsion aufgehoben werden, wenn noch mehr Elemente des bezeichneten Fluidums hinzukommen. Man sehe hierüber auch Seite 226 fg.

180. Wegen der Verschiedenheit der Körper, je nachdem sie aus diesen oder jenen Stoffen zusammengesetzt sind, wird auch die Anziehung zwischen dem Elektricum und verschiedenen Körpern ungleich sein. Dann kommt noch die verschiedene Configuration, die größere oder geringere Dichtigkeit der Körper in Betracht. Von diesen Umständen wird vorzugsweise die Freiheit abhängen, mit welcher sich das Elektricum in der Materie bewegen kann. Uebrigens wird das Elektricum die Elemente oder Molecüle der Materie vermöge der zwischen ihnen bestehenden Anziehung auf ähnliche Weise einhüllen, wie der Wärmeäther. Eine gewisse Menge des Elektricums, welches wir mit E bezeichnen wollen, wird sich auf diese Weise beharrlich der Materie anschließen können; sobald aber diese Quantität überschritten wird, entsteht nothwendig eine verstärkte Repulsion zwischen den Elementen des Elektricums selbst, wodurch es veranlaßt wird, von innen heraus gegen die Oberfläche zu drängen, da die Repulsion, wie leicht einzusehen,

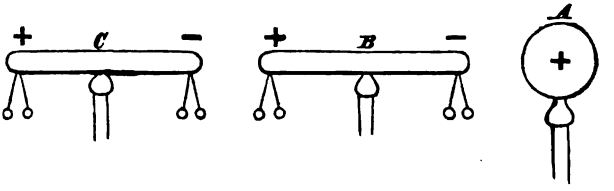
Digitized by Google

im Innern des Körpers am stärksten sein muß. Aber auch an der Oberfläche wird die Repulsion noch wirksam sein und zwar um so gewisser, da nun das Elektricum hier angehäuft ist. Vermöge derselben Repulsion also, um derentwillen es das Innere des Körpers verlassen mußte, wird es einen Antrieb empfangen, sich von der Oberfläche des Körpers aus in den umgebenden Raum zu zerstreuen. Die wirkliche Zerstreuung des E kann nur verhindert werden, wenn der erwähnte Raum von einer Materie erfüllt ist, welche ihm keine freie Bewegung gestattet. Kraft der fortdauernden Wirksamkeit jener Repulsion wird aber das an der Oberfläche des Körpers angehäufte E einen Druck ausüben, welcher sich unbestimmt in die umgebende Materie fortpflanzen kann. Da aber das E auch um die Elemente und Molecüle dieser Materie seine Sphären gebildet haben wird, so können sich die letzteren hinsichtlich jenes Druckes nicht gleichgültig verhalten. Ist nun die umgebende Materie eine solche, worin sich das E nicht frei bewegen kann, so wird der von der Oberfläche des Körpers ausgehende Druck zunächst auf die elektrischen Sphären dieser Materie seine Wirkung äußern, indem sie an der einen Seite, woher der Druck kommt, abgeplattet, an der anderen aber ausgedehnt, also auch dort dichter, hier dünner werden. Nun können aber diese Sphären jenen Druck nicht in sich aufnehmen, ohne zu reagiren, und eben dadurch, daß sie die Gewalt, welche sie erleiden, zurückwirken lassen, halten sie das Elektricum auf der Oberfläche jenes Körpers fest. Man sieht aber auch weiter, daß es nicht gleichgültig sein kann, wie die Oberfläche, von welcher der erwähnte Druck ausgeht, gestaltet ist. Kommt der Druck z. B. von einer hohlen (concaven) Fläche, so convergiren seine Richtungen, die Sphären drängen wider einander und widerstehen einander um so mehr, je größer die Concavität ist. Das Gegentheil findet statt, wenn der Druck von einer erhabenen (converen) Fläche ausgeht, weil alsdann seine Richtungen divergiren. Die Sphären hindern dann einander viel weniger, sie sind weit nachgiebiger und das E, welches den Druck bewirkt, wird sich an solchen Flächen vorzugsweise ansammeln, da der größte Theil des Widerstandes, welcher bei concaven und ebenen Flächen stattfindet, wegfällt. Ist also das E in irgend einer Masse angehäuft, so wird seine Dichtigkeit an solchen Punkten am größten sein, welche conver gegen die Umgebung sind, mithin Spitzen, Hervorragungen u. dgl. bilden. Hieraus ergiebt sich ganz einfach, daß sich die Elektricität auf einer Kugel ganz gleichförmig vertheilen muß, nicht aber auf Körpern, deren Ausdehnung nach verschiedenen Richtungen hin ungleich ist.

Digitized by Google

Denken wir uns eine beliebige Menge von Körpern, welche in bestimmten Entfernungen einander gegenüber stehen, so wird zwischen ihnen elektrisches Gleichgewicht stattfinden, so lange die Repulsion, welche von ihren Oberflächen ausgeht, bei allen gleich stark ist. Tritt aber Ueberschuß oder Mangel an E in dem einen oder anderen dieser Körper ein, so ist jenes Gleichgewicht aufgehoben.

181. Wir wollen uns jetzt einen sogenannten Leiter der Elektricität denken, d. h. einen Körper, worin sich das E frei bewegen kann. Ist derselbe mit E angefüllt, so wird sich das letztere nach der Oberfläche begeben, um sich von da aus vermöge der zwischen seinen Elementen bestehenden Repulsion zu zerstreuen. Damit dies nicht geschehe, mag der Leiter von einem sogenannten Nichtleiter, z. B. von atmosphärischer Luft umgeben sein. Diesem Leiter werde in einiger Entfernung ein zweiter Leiter gegenübergestellt, welcher sich im natürlichen Zustande befindet, d. h. welcher von E nicht dergestalt erfüllt ist, daß er einen eben so starken Druck wie jener ausüben kann. In nachstehender Figur sei A der erste und B der zweite Leiter. Alsdann wirkt



der von A kommende Druck durch die elektrischen Sphären der Luf hindurch auf B und zwar zunächst auf den vorderen Theil desselben, wodurch das hierselbst befindliche E genöthigt wird, die andere Hälfte von B einzunehmen. Weil aber die elektrische Spannung auf der dem Leiter B zugekehrten Fläche von A dadurch, daß sie sich auf den ersteren fortpflanzt, geschwächt wird, so werden die auf der hinteren Fläche von A befindlichen Elemente des E, zwischen denen die Repulsion noch unvermindert besteht, veranlaßt, sich nach jener Seite zu begeben, an der, wie soeben bemerkt, die Spannung nachgelassen hat. Zugleich hat der Leiter A dadurch die Fähigkeit erlangt, noch eine gewisse Quantität von E aufzunehmen, namentlich von derjenigen Seite her, welche der Fortpflanzungsrichtung des Druckes entgegengesetzt ist. Man erkennt, daß die Capacität des A für neues E noch größer werden wird, wenn man das in B aufgeregte E ableitet, weil alsdann der Gegendruck des letzteren wegfällt. Man sieht nun, daß das von A abgewendete Ende von B sich mit A in demselben elektrischen Zustande

Digitized by Google

befindet, weil das Elektricum durch die Wirkung des beschriebenen Druckes hier angehäuft ist. Dagegen befindet sich das dem A zugekehrte Ende von B in einem entgegengesetzten elektrischen Zustande, weil hier verhältnißmäßig eine sehr geringe Menge des E vorhanden ist. Diese entgegengesetzten elektrischen Zustände haben wir in der Figur mit + und — bezeichnet, wie es gebräuchlich ist. Weil das Elektricum an dem einen Ende des Leiters B angehäuft ist, so geht auch von hier ein elektrischer Druck aus, welcher in einem benachbarten Leiter C wieder dieselbe Vertheilung hervorbringen kann, wie A in B. Auf diese Weise kann sich die Wirkung des elektrischen Druckes auf eine nicht unbedeutende Entfernung fortpflanzen.

Giebt man derjenigen Elektricität, welche während der Vertheilung an der einen Seite eines isolirten Leiters angehäuft ist, eine hinreichende Ableitung, so kommt der Leiter dadurch überall in einen gleichartigen elektrischen Zustand, welcher dem des vertheilend wirkenden Körpers stets entgegengesetzt ist.

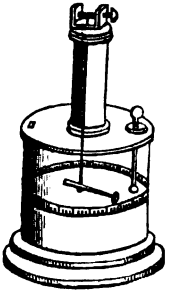
182. Man denke sich zwei bewegliche Körper, von denen der eine positiv elektrisch, d. h. mit E beladen, der andere aber negativ elektrisch in unserem Sinne ist, wo er also weniger Elektricität als im gewöhnlichen Zustande enthält. Werden nun beide Körper einander hinreichend genähert, so wird der von dem positiv elektrischen Körper ausgehende Druck zunächst auf die elektrischen Sphären der Luft wirken, so daß sich diese nach dem negativ elektrisirten Körper hindehnen und in denselben zum Theil eindringen, ohne sich jedoch von den Molecülen der Luft zu trennen. Hierdurch wird dieser Körper zu dem positiv elektrischen hingezogen und zwar wird die Anziehung fortwährend beschleunigt, indem der Körper nach Punkten kommt, in welchen der elektrische Druck stärker, also auch die Anziehung bedeutender ist. Sind beide Körper beweglich, wie wir angenommen haben, so ist die Annäherung natürlich gegenseitig. — Denkt man sich aber beide Körper überfüllt mit E oder, was dasselbe ist, beide positiv elektrisirt, so verbreiten sie jenen Druck nach allen Richtungen gegen einander, woraus Abstoßung folgt. Die Voraussetzung der Attraction ist also, daß der elektrische Druck nur von einem der beiden Körper ausgeht; denn nur hierdurch ist es möglich, daß die Sphären des E in den anderen eingreifen und diesen nach dem ersten hinziehen. Es ist nun noch ein dritter Fall möglich, nämlich, daß beide Körper negativ elektrisirt sind, oder daß sie weniger Elektricität als die umgebende Materie enthalten. Die elektrischen Sphären der letzteren werden sich alsdann ringsum zu diesen Körpern hindehnen, um das

Digitized by Google

elektrische Gleichgewicht wieder herzustellen, wodurch die Körper selbst nach entgegengesetzten Seiten angezogen werden, was nun den Schein einer gegenseitigen Abstoßung gewähren muß. Die Abstoßung zwischen beiden Körpern ist also hier im Grunde nur scheinbar, insofern sie von Anziehungen nach entgegengesetzten Richtungen herrührt.

Je stärker nun die Anhäufung des E, mithin auch je größer die Dichtigkeit desselben auf der Oberfläche eines Körpers, desto stärker der elektrische Druck. Die Anziehung zwischen zwei entgegengesetzt elektrisirten Körpern wird um so bedeutender sein, je größer die Dichtigkeit des E in dem einen und je größer der Mangel des E in dem anderen Körper ist. Die Abstoßung zwischen zwei positiv elektrisirten Körpern muß mit der Dichtigkeit des E auf ihrer Oberfläche in directem Verhältnisse stehen, bei zwei negativ elektrisirten Körpern aber mit der Größe des Mangels an E, weil mit ihr die Anziehung zwischen den elektrischen Sphären der Umgebung und jenen Körpern in demselben Verhältnisse wachsen wird.

183. Coulomb hat die Gesetze der elektrischen Anziehung und Abstoßung mit Hülfe seiner Drehwage bestimmt. Der Boden und das Gestelle des Apparates bestehen hier aus trockenem, überfirnißtem Holze, während die Wände ein Glascylinder bildet, der mit einem Deckel aus Glas verschlossen ist. Uebrigens ist der Apparat auf ganz ähnliche Weise wie die früher beschriebene Drehwage eingerichtet. Ein Silber- oder Messingfaden trägt nun eine leichte Nadel von Schellack, an deren einem Ende sich ein Kügelchen von Hollundermark oder ein Scheibchen von Blattgold befindet. Diesem Scheibchen wird eine bestimmte Elektricität mitgetheilt und dann ein mit derselben Elektricität geladenes Scheibchen oder Kügelchen, welches sich an dem unteren Ende eines vertical gehaltenen Schellackstäbchens befindet, in den Apparat gebracht. Alsdann erfolgt eine Abstoßung, deren Gesetz sich auf dieselbe Weise ermitteln läßt, wie bei den früher erörterten magnetischen Versuchen. Coulomb fand, daß die Abstoßung im geraden Verhältnisse mit der Dichtigkeit der Elektricität und im umgekehrten mit dem Quadrate der Entfernung steht. Aehnliches ergab sich für die elektrische Anziehung. Um diese Gesetze auch noch auf eine andere Weise zu bestätigen, ließ Coulomb eine an einem Seidenfaden hängende und auf die erwähnte Art vorgerichtete Schellacknadel unter dem Einflusse einer isolirten elektrischen Kugel



Digitized by Google

oscilliren und ermittelte dann aus den beobachteten Oscillationen die beschleunigenden Kräfte, welche sich nach den Gesetzen des Pendels bekanntlich wie die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten.

184. Wenn die Dichtigkeit des E auf der Oberfläche eines Körpers eine gewisse Grenze überschreitet, so erreicht die Repulsion zwischen den Elementen des E einen so hohen Grad, daß dieselben nicht mehr auf der Oberfläche bleiben können; sie werden fortgeschleudert und durchbrechen dabei die Schichten der umgebenden nicht leitenden Materie. Befindet sich ein leitender Körper, welcher im natürlichen Zustande oder gar negativ elektrisirt ist, in der Nähe, so bewegen sich in diesen die Elemente des E hinein. Je ausgedehnter die Oberfläche dieses Leiters ist, desto größer ist seine Capacität für das E, um so vollständiger wird dann auch die Entladung des Körpers sein, in welchem die Elektricität angehäuft ist. Auch ist zu erwarten, daß Massentheilchen von der Oberfläche des mit E überladenen Körpers mit fortgerissen werden, da immer noch ein Theil der Elemente des E, zwischen denen die Repulsion stattfindet, mit den Molecülen des Körpers verbunden ist. Im luftleeren Raume muß es dem E wegen mangelnden Widerstandes natürlich viel leichter werden, die Oberfläche eines Körpers zu verlassen. Doch muß auch bei gewöhnlicher Anhäufung des E schon ein Verlust stattfinden, in Folge dessen sich der elektrische Körper fortwährend mit seiner Umgebung ins elektrische Gleichgewicht setzt, indem er allmälig sein überschüssiges E verliert. Denn die Elektricität wird durch Repulsion ihrer Elemente größtentheils nach der Oberfläche getrieben, von wo aus sie, weil die Repulsion auch hier noch wirksam ist, jenen Druck ausübt, welcher sich durch die umgebende Materie fortpflanzt. Dieser Druck ist aber unmittelbar mit dem Streben des E, sich von der Oberfläche des Körpers zu entfernen, verbunden, und nur die Rückwirkung der elektrischen Sphären jener Materie verhindert, daß sich das E wirklich von der Oberfläche entfernt. Bei stärkerer Anhäufung wird nun der Widerstand, welcher aus dieser Rückwirkung entspringt, überwunden; das E entweicht und erscheint in der Gestalt des elektrischen Funkens. Während nun hier das elektrische Gleichgewicht sich großentheils mit einem Male herstellt, findet bei geringerer Beladung des Körpers mit E kraft jenes Druckes ein allmäliges Entweichen und damit ein eben so allmäliges Zurückkehren in den natürlichen Zustand statt. Da sich das E an Spitzen und sonstigen Hervorragungen der Oberfläche vorzugsweise ansammelt, so wird auch an diesen der Verlust am größten sein.

Auch der am besten isolirte Leiter erfährt stets einen gewissen

Digitized by Google

Verluſt, theils durch die Luft, theils durch die iſolirenden Träger ſelbſt, indem er in den letzteren eine Vertheilung bewirkt, in Folge deren die Elektricität der Träger in den Boden getrieben wird. Dabei giebt der Leiter einen beſtimmten Antheil ſeines E an den Träger ab, um den Verluſt, welchen derſelbe erlitten hat, zu erſetzen. Der Verluſt durch die iſolirenden Träger iſt namentlich dann von Bedeutung, wenn ſie mit einer Feuchtigkeitsſchicht bedeckt ſind. Deshalb überzieht man die iſolirenden Glasſtäbe noch mit Schellackfirniß und ſucht überdies alle anhängende Feuchtigkeit durch Erwärmen möglichſt zu beſeitigen. Wenn ein Leiter durch ſeine Stützen vollſtändig iſolirt iſt, ſo darf er, mit mehreren derſelben in Berührung gebracht, nicht mehr verlieren, als wenn er nur von einem einzigen getragen wird.

Der größte Theil des Verluſtes, welchen ein iſolirter Leiter in der Luft erleidet, kommt auf Rechnung der darin enthaltenen Feuchtigkeit; aber auch in ganz trockner Luft muß der Leiter nach dem Früheren einiges E verlieren, was durch den Verſuch beſtätigt wird. Bei einem Verſuche, den hierüber Coulomb mittelſt ſeiner Drehwage anſtellte, war die abſtoßende Kraft der beiden Kügelchen in ganz trockner Luft einer Windung des Drahtes von 270° proportional. Aber ſchon nach 1 Minute mußte dieſe Windung um 6° vermindert werden, um den anfänglichen Abſtoßungswinkel, welcher 20° betrug, wieder zu erhalten. Die Abſtoßung der Kügelchen war nunmehr einer Windung von 264° proportional. Der während 1 Minute erfolgte Verluſt entſprach alſo einer Windung von 6°. Die mittlere elektriſche Kraft oder die mittlere Elektricitätsmenge betrug während dieſer Minute $\frac{270 + 264}{2} = 267°$, da beim Beginn der Minute die elektriſche Kraft gleich einer Torſion von 270° und zu Ende derſelben gleich einer Torſion von 264° war. Hiernach iſt der einer Torſion von 6° entſprechende Verluſt gleich $\frac{6}{267} = \frac{1}{44,5}$ der mittleren Elektricitätsmenge. Nach Coulomb's Verſuchen beträgt der Verluſt an trocknen Tagen während 1 Minute durchſchnittlich $^1/_{60} - ^1/_{70}$ der mittleren Spannung, an feuchten aber häufig $^1/_{20}$ derſelben.

185. Ueberall, wo zwei verſchiedenartige Körper an einander gerieben werden, haben wir eine Störung des elektriſchen Gleichgewichtes zu erwarten. Schon die verſchiedene chemiſche Natur der Körper muß Unterſchiede bewirken, vermöge deren das Elektricum veranlaßt wird, ſich mehr in dem einen oder anderen anzuhäufen; denn die Stärke der Anziehung für das E muß alsdann verſchieden ſein.

Digitized by Google

Nicht minder von Bedeutung ist hierbei die verschiedene Anordnung hinsichtlich der Lage der Molecüle, die größere oder geringere Dichtigkeit der Körper, was von selbst einleuchten muß, wenn man sich an die Neigung des E erinnert, die Massentheilchen der Körper sphärenartig einzuhüllen. Selbst die Farbe, sowie überhaupt die natürliche oder künstlich hervorgebrachte Beschaffenheit der Oberfläche kann nicht ohne Einfluß sein, weil hierdurch die Fähigkeit eines Körpers, noch mehr E aufzunehmen oder zu entlassen, vergrößert oder verringert wird. Auch Körper von sonst ganz gleicher Beschaffenheit können vermöge solcher Unterschiede durch Reiben entgegengesetzt elektrisch werden; wenn man z. B. eine polirte Glasscheibe auf einer mattgeschliffenen reibt, so wird die eine positiv, die andere negativ elektrisch. Auch die Verschiedenheit der Zustände, in denen sich die Körper während des Reibens befinden, sind dabei zu berücksichtigen. Reibt man z. B. zwei Stücke desselben Bandes kreuzweise, so werden sie gleichfalls entgegengesetzt elektrisch, und zwar das festgehaltene positiv, das andere negativ. Aus diesem Allen folgt, daß an einander geriebene Körper allemal in entgegengesetzte elektrische Zustände gerathen müssen.

Durch Druck kann nun eben so wohl als durch Reiben Elektricität entwickelt werden, wobei sich ähnliche Unterschiede wie oben geltend machen müssen. Libes drückte eine Metallscheibe vermittelst eines isolirenden Handgriffes von Glas auf Wachstaffent, wodurch sie elektrisch wurde. Denn dasjenige E, welches im Taffent enthalten war, konnte in Folge des ausgeübten Druckes nicht mehr ruhig darin verweilen, sondern mußte vermöge der Repulsion zwischen seinen Elementen in die Metallscheibe fliehen, welche sich zunächst darbot, von jenem Drucke am wenigsten gelitten hatte und wegen ihrer Leitungsfähigkeit am geschicktesten war, neues E aufzunehmen. Man sieht leicht, daß die hierdurch hervorgerufene elektrische Spannung um so bedeutender sein muß, je stärker der Druck ist und je inniger die Körper während des Druckes an einander haften, besonders wenn sie einige Elasticität besitzen. Weil das E beim Druck gleichsam herausgepreßt wird, so muß es zu demjenigen Körper übergehen, dessen Zusammendrückbarkeit geringer ist und zwar um so mehr, wenn derselbe aus einer leitenden Substanz besteht.

Wenn die Cohäsion eines Körpers gewaltsam aufgehoben wird, so muß nothwendig Elektricität entwickelt werden; denn die Sphären, welche das E um die Molecüle der Körper gebildet hat, können sich dann unmöglich ruhig verhalten, vielmehr muß das E zum Theil frei werden und die geringste Verschiedenheit auf der einen oder anderen

Digitized by Google

Seite wird entgegengesetzte elektrische Zustände veranlassen. Daß durch mechanische Trennung Elektricität frei wird, zeigt sich beim Spalten von blätterigen oder überhaupt krystallisirten Mineralien, beim Zerreißen und Zerschlagen fester Körper, wobei man oft einen phosphorescirenden Schein bemerkt.

Schon der bloße Contact heterogener Körper muß von elektrischen Erscheinungen begleitet sein, worauf wir später ausführlicher zurückkommen werden.

Nach Sellier soll auch bei schwingenden Platten eine Elektricitätsentwickelung stattfinden. So werden nach ihm Scheiben, welche man zur Erzeugung Chladnischer Klangfiguren benutzt, elektrisch und zwar die schwingenden und ruhenden Stellen auf entgegengesetzte Weise, wie sich dies aus den verschiedenen Figuren, welche aufgestreutes Kiesel- oder Harzpulver bildet, schließen läßt. Das Elektricum nämlich, welches die schwingenden Theilchen der Scheibe umgiebt, geräth ebenfalls in Bewegung und damit in Repulsion, in Folge deren es zum Theil nach solchen Stellen der Scheibe entweicht, welche sich nicht im schwingenden Zustande befinden, d. h. nach den sogenannten Knotenlinien. Die letzteren müssen deshalb positive, die tönenden Stellen aber negative Elektricität zeigen.

Schon in alter Zeit kannte man am Turmalin die Eigenschaft, leichte Körper, wie Asche, anzuziehen und wieder abzustoßen. Wenn man ihn nämlich regelmäßig erwärmt, so wird das eine Ende seiner krystallographischen Hauptare positiv, das andere negativ elektrisch. Diese Polarität bleibt die nämliche, so lange die Temperatur steigt. Läßt man ihn aber wieder langsam erkalten, so kommt ein Augenblick, wo seine Polarität verschwindet und dann sich umkehrt, indem der vorher positive Pol negativ, der vorher negative aber positiv wird. Beim ferneren Sinken der Temperatur bleibt die nunmehrige Lage der Pole unverändert. Hiernach scheint die elektrische Polarität des Turmalins nur vom Wechsel der Temperatur abzuhängen. Wenn man aber einen Turmalin, während er elektrisch ist, quer durchbricht, so zeigt jedes Stück wieder seine beiden Pole, woraus man schließen kann, daß diese Polarität in der Constitution der kleinsten materiellen Theilchen des Turmalins begründet ist. Auch ein Stäbchen von Schwefelantimon kann durch die Elektricität eine dem Magnetismus ähnliche Polarität erlangen, so daß jedes davon abgebrochene Stückchen zwei Pole zeigt, was ohne Zweifel gleichfalls nur in der Zusammensetzung der kleinsten Massentheilchen dieses Körpers seinen wahren Grund hat.

Digitized by Google

186. Die im Vorhergehenden entwickelte Theorie beruht auf der Annahme Franklin's von einem einzigen elektrischen Fluidum. Nach einer anderen Hypothese, welche von R. Symmer näher begründet worden, soll es zwei elektrische Fluida geben, welche sich überall durch gegenseitige Anziehung mit einander zu verbinden oder zu neutralisiren suchen. Wenn sich nun beide Elektricitäten in einem Körper gegenseitig gesättigt haben, so ist er unelektrisch oder natürlich elektrisch. Durch die bekannten Erregungsmittel der Elektricität wird das neutrale Product beider E (= ± E) zersetzt und dadurch die positive und negative elektrische Spannung hervorgerufen. Reibt man z. B. zwei Körper, die sich im natürlichen Zustande befinden, an einander, so soll nach der Verschiedenheit der Verwandtschaft, welche die Körper zu dem einen oder anderen Bestandtheile der Elektricität haben, das eine Fluidum an den reibenden, das andere an den geriebenen] Körper treten, so daß jedesmal entgegengesetzte elektrische Zustände entstehen. Wenn man aber auf das bisher Gesagte etwas genauer reflectirt, so bemerkt man leicht, daß die Elektricitätsentwickelung durch Reiben damit keineswegs erklärt ist. Denn hat der reibende oder geriebene Körper wirklich eine stärkere Verwandtschaft zu dem einen oder anderen Bestandtheile der Elektricität, als diese Bestandtheile zu einander haben, so kann er sich unmöglich im natürlichen Zustande befinden, weil er schon vor dem Reiben das neutrale Product ± E zerlegt haben muß, um sich den entsprechenden Bestandtheil anzueignen. Der andere Bestandtheil macht dann den Körper, indem er sich auf dessen Oberfläche verbreitet, zu einem positiv oder negativ elektrischen. Inwiefern nun das Reiben selbst die eigentliche Ursache der Zerlegung des ± E sein kann, ist nach dieser Hypothese völlig unbegreiflich. Sie selbst sucht den Grund vorzugsweise in der verschiedenen Verwandtschaft oder Anziehung, welche die Körper zu dem einen oder anderen Bestandtheile der Elektricität haben, so daß keine Elektricitätsentwickelung stattfindet, wenn beide Körper eine gleich starke Verwandtschaft zu den beiden Elektricitäten haben oder wenn sich die Bestandtheile des ± E unter einander stärker anziehen, als sie von den sich reibenden Körpern angezogen werden.

Wenn in irgend einem Körper das elektrische Gleichgewicht aufgehoben und z. B. + E frei ist, so strebt dieses nach der Symmer'schen Hypothese in einem benachbarten Körper den natürlich elektrischen Zustand gleichfalls aufzuheben und die Bestandtheile des ± E aus einander zu bringen, indem es das — E dieses Körpers anzieht, das

Digitized by Google

+E aber zurückstößt. Auf solche Weise soll der andere Körper durch Vertheilung elektrisch werden.

Ohne Zweifel stützt sich diese Hypothese auf einige chemische Grundbegriffe, wozu der Gegensatz zwischen der Harz- und Glaselektricität den Anlaß gegeben hat. Gleiche Quanta + und —E sättigen sich, so daß der Körper, worin sie sich befinden, keine Spur von Elektricität zu erkennen giebt. Durch freies + oder —E soll nun das in Folge dieser Neutralisation entstandene Product zersetzt werden, was aber so leicht nicht möglich ist. Denn hat sich einmal ein gewisses Quantum +E mit einem gleichen Quantum —E gesättigt, so sind beide hinsichtlich ihres Strebens, sich zu neutralisiren, befriedigt, und können durch freies + oder —E, welches sich in der Nähe befindet, nicht wieder von einander getrennt werden. Es hat wenigstens durchaus keinen Sinn, wenn man sagt, +E, welches durch —E neutralisirt ist, verläßt dasselbe nur deshalb, um sich mit anderem —E von Neuem zu einem neutralen Producte zu vereinigen. Die Chemie gewährt dafür kein passendes Beispiel. Die in Rede stehende Hypothese verstößt also schon bei ihrem ersten Schritte gegen diejenigen Begriffe, welche ihr zu Grunde liegen. Außerdem ist es auch nicht so ganz leicht, sich von zwei entgegengesetzten elektrischen Flüssigkeiten einen ganz klaren Begriff zu bilden. Doch auch abgesehen von dem Allen glauben wir, daß die Annahme von zwei solchen Flüssigkeiten einen Ueberfluß enthält, dessen wir zur Erklärung der elektrischen Erscheinungen nicht bedürfen. Im Folgenden werden wir stets nur auf ein elektrisches Fluidum Rücksicht nehmen.

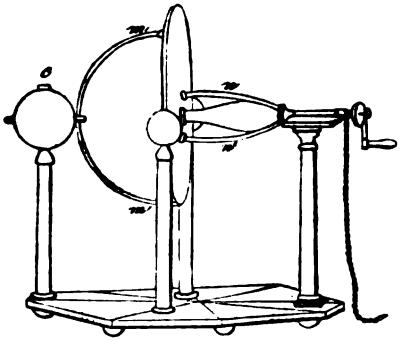
Zweites Kapitel.

Erklärung verschiedener Apparate, welche auf dem Gesetze der elektrischen Vertheilung beruhen, und anderer hierher gehöriger Erscheinungen.

187. Wir wollen zunächst die Elektrisirmaschine betrachten, welche gewöhnlich gebraucht wird, um durch's Reiben eine größere Menge von Elektricität zu entwickeln. Dieselbe besteht aus dem geriebenen Körper, welcher aus Glas, Harz, Seidenzeug oder einem anderen sogenannten Nichtleiter verfertigt sein kann, dem Reibzeuge und dem isolirten Leiter (Conductor). Das Reibzeug ist gewöhnlich ein mit Pferdehaaren ausgestopftes Lederkissen, dessen Oberfläche mit einem leitenden Amalgam von 6 Theilen Quecksilber, 2 Th. Zink und 1 Theil Zinn bestrichen wird. Die Figur zeigt eine Elektrisirma-

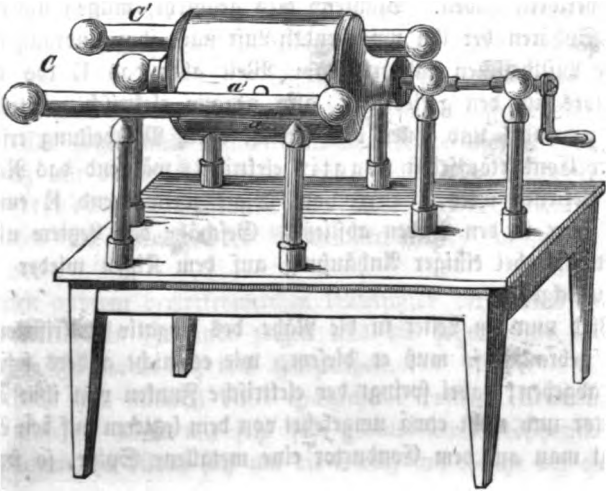
Digitized by Google

ſchine nach Marum's Conſtruction.



Eine geſchliffene Glasſcheibe iſt an einer gläſernen Axe befeſtigt, mit der ſie durch eine Kurbel gedreht werden kann. Die beiden Reibzeuge befinden ſich an den Enden des horizontalen Durchmeſſers der Scheibe und zwar an zwei Hohlkugeln von Meſſingblech, welche von iſolirenden Glasſäulen getragen werden. Die beweglichen Metallbogen mm′ und nn′ haben ſtets eine ſolche Stellung zu einander, daß ihre Ebenen auf einander ſenkrecht ſtehen. In unſerer Figur ſteht der mit dem Conductor c verbundene Bogen mm′ vertical, der Bogen nn′ aber, welcher mit dem Reibzeuge verbunden iſt, horizontal. Auch iſt der Bogen nn′ durch eine Kette mit dem Boden in leitender Verbindung, ſo daß die Elektricität des Reibzeuges auf dieſe Weiſe abgeführt wird, während der Conductor c durch den Bogen mm′ mit der entgegengeſetzten Elektricität geladen wird. Hat aber der Bogen mm′ eine horizontale und nn′ eine verticale Stellung, ſo ſind die elektriſchen Zuſtände des Reibzeuges und Conductors die gerade entgegengeſetzten von denen im vorigen Falle, weil nun der Bogen mm′ mit dem Reibzeuge in Verbindung ſteht.

Folgende Figur zeigt Nairne's Elektriſirmaſchine, welche ſo



Digitized by Google

eingerichtet ist, daß sie beide Elektricitäten auf zwei verschiedenen Conductoren C und C′ zugleich giebt. Der geriebene Körper ist hier ein großer Glascylinder, welcher, wenn man ihn vermittelst der Kurbel um seine horizontale Axe dreht, seiner ganzen Länge nach von einem einzigen Kissen a gerieben wird, das mit dem Conductor C in Verbindung steht. Dem letzteren befindet sich diametral gegenüber der Conductor C′, welcher auf der dem Cylinder zugekehrten Seite mit Spitzen versehen ist. Wenn man nun den Glascylinder dreht, so werden die beiden Conductoren mit entgegengesetzten Elektricitäten geladen; soll aber der Conductor C′ eine möglichst starke Ladung erhalten, so muß man auch hier den anderen C mit dem Boden leitend verbinden. Die obere Hälfte des Cylinders ist mit einem Stück Wachstaffent bedeckt, damit das am Reibzeuge geriebene Glas auf dem Wege bis zum Conductor C seinen elektrischen Zustand nicht verliert.

Es ist nicht schwer einzusehen, was geschieht, wenn man die Glasscheibe oder den Glascylinder der Maschine umdreht, um sie an dem mit Amalgam überzogenen Lederkissen zu reiben. Das Elektricum, welches in dem Glase vorhanden ist, kann während des Reibens nicht ruhig darin verweilen, sondern es muß in's leitende Amalgam, welches mit dem Glase in unmittelbarer Berührung ist, und von da in den Boden entweichen, wenn dieser mit jenem in leitender Verbindung steht. Das Glas erleidet also wegen der Aufregung seiner Theilchen durch's Reiben einen Verlust an E oder es wird negativ elektrisch. Nun nähern sich aber die geriebenen Stellen des Glases dem isolirten Conductor, welcher denselben so viel E abgiebt, als sie durch das Reiben verloren haben. Während dies geschieht, müssen sich die elektrischen Sphären der ihn umgebenden Luft nach ihm hindrängen, ohne doch die Lufttheilchen zu verlassen. Weil aber das E des isolirten Conductors sich den geriebenen, also negativ elektrischen Stellen des Glases zuwendet und ihnen den Verlust durch Mittheilung ersetzt, so wird der Conductor selbst *negativ* elektrisirt, während das Reibkissen positiv elektrisch wird, da es vom Glase fortwährend E empfängt, welches aber in den Boden abfließt. Geschähe das Letztere nicht, so müßte das E bei einiger Anhäufung auf dem Kissen wieder in das Glas zurückgehen.

Wird nun ein Leiter in die Nähe des negativ elektrisirten Conductors gebracht, so muß er diesem, wie es nicht anders sein kann, sein E abgeben; dabei springt der elektrische Funken von ihm auf den Conductor und nicht etwa umgekehrt von dem letzteren auf den ersteren. Befestigt man auf dem Conductor eine metallene Spitze, so strömt in

Digitized by Google

diese das Elektricum der umgebenden Luft in Gestalt eines leuchtenden Feuerbüschels ein; nähert man aber dem Conductor eine Metallspitze, so zeigt sich an dieser ein viel kleinerer Lichtbüschel oder ein leuchtender Stern, indem aus ihr das E hervorbricht, um nach dem negativ elektrischen Conductor überzugehen. In Wahrheit können nur diejenigen Körper leuchten, welche das E wirklich aussenden, nicht aber die, welche es empfangen. An der auf dem Conductor befestigten Spitze erscheint deshalb ein Strahlenbüschel, weil die Lufttheilchen in gewisser Entfernung um die Spitze herum ihr Elektricum an diese abgeben; sie selbst (die Lufttheilchen) leuchten dann, nicht aber die Spitze, welche das E von jenen empfängt und in der es verschwindet. Eine dem Conductor entgegengehaltene Metallspitze entläßt ihr E in Gestalt eines leuchtenden Sterns; hier ist es nur ein Punkt oder doch nur wenige Punkte, welche Elektricum nach dem Conductor hin aussenden, dort aber sind es sämmtliche Lufttheilchen in der Nähe der Spitze, welche dieser Elektricität abgeben, also viele leuchtende Punkte, welche zusammen die Erscheinung eines Lichtbüschels verursachen.

Wir haben hiermit ein unterscheidendes Merkmal der beiden elektrischen Zustände. Da dieses Phänomen an Metallspitzen vorzüglich bemerkbar hervortritt, so können wir sagen: diejenigen Spitzen, welche nur einen leuchtenden Stern oder eine Strahlenkrone zeigen, sind positiv elektrisch und senden daher auch wirklich Elektricum aus; diejenigen hingegen, welche einen langen Lichtbüschel zeigen, sind negativ elektrisch, indem sie das E von verschiedenen Seiten her empfangen.

Hiernach sehen wir uns aber genöthigt, die gewöhnliche Bezeichnungsart durch + und — umzukehren, da man diejenige Elektricität, welche die wahrhaft positive ist, insgemein negativ und umgekehrt, was bei uns in der That negativ ist, gewöhnlich positiv nennt. Die sogenannte Harzelektricität, welche man erhält, wenn man Harz mit einem Katzenfelle, mit Wolle oder Seide reibt, ist die positive; die Glaselektricität aber, welche durch Reiben des Glases mit Wolle oder Seide hervortritt, nennen wir die negative.

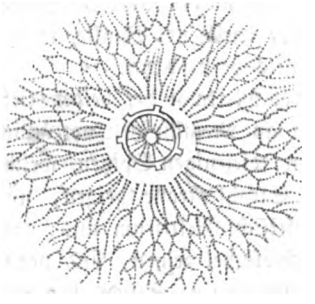
Einen anderen bemerkeswerthen Unterschied der beiden entgegengesetzten elektrischen Zustände zeigen uns die sogenannten Lichtenberg'schen Figuren auf dem Harzkuchen.

Ertheilt man nämlich einer Harzscheibe positive Elektricität und bestreut man sie dann mit sehr fein gepulvertem Colophonium oder Bärlappsamen, so bilden sich um die Stelle, auf welche der elektrische

Digitized by Google

Funken ſchlug, ſtrahlenloſe Ringe oder Zonen. Denn das Elektricum, welches die Harzſcheibe an einem Punkte erhielt, konnte ſich von da aus nicht gleichförmig nach allen Richtungen verbreiten, wie dies bei einem guten Leiter der Elektricität geſchieht, ſondern es mußten ringsum abwechſelnde Verdichtungen und Verdünnungen, d. h. Zonen entſtehen, welche der aufgeſtreute Staub ſichtbar machte.

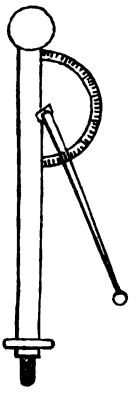
Wird aber die Harzſcheibe an irgend einer Stelle negativ elektriſirt, d. h. wird ihr an dieſer Stelle E entzogen, ſo muß das Elektricum aus den umliegenden Stellen in gewiſſen Radien nach jener Stelle dringen, um den Mangel zu erſetzen. Die erwähnten Zonen können ſich jetzt nicht bilden, da das E nicht, wie im vorigen Falle, auf der Harzſcheibe irgendwo angehäuft iſt; vielmehr wird das E des Harzes ſelbſt in ſolchen Richtungen, in denen der geringſte Widerſtand ſtattfindet, herbeiſtrömen, um die leere Stelle auszufüllen. Dieſe Richtungen bilden die Strahlen eines Sternes, wie das aufgeſtreute Pulver zeigt. Indem nun das E des Harzkuchens in beſtimmten Hauptrichtungen nach der leeren Stelle dringt, müſſen gleichzeitig von der Seite her ähnliche Bewegungen des E gegen jene Richtungen hin erfolgen, weil eben dadurch, daß das E in den letzteren ſich hinweg begiebt, für das E der zwiſchenliegenden Stellen ein Antrieb entſteht, das elektriſche Gleichgewicht wieder herzuſtellen. Daher die dendritenähnlichen Veräſtelungen, welche jener Stern in der Regel zeigt.



Die von der poſitiven Elektricität herrührenden Figuren erhält man ganz einfach, wenn man auf einen glatten Harzkuchen ein Metallrohr oder ein Metallglöckchen ſetzt und auf dieſes vom Reibzeug der Maſchine einen Funken ſchlagen läßt. Die der negativen Elektricität entſprechenden Figuren ergeben ſich, wenn man dem Metallglöckchen vermittelſt des negativ elektriſirten Conductors einen Funken entlockt.

Um den Grad der Ladung eines Conductors zu beurtheilen, pflegt man das Henley'ſche Quadrantenelektrometer aufzuſchrauben.

Digitized by Google



Daſſelbe beſteht aus einem Halbkreiſe von Elfenbein, welcher in Grade eingetheilt und an einem runden, leitenden Stabe befeſtigt iſt. Um den Mittelpunkt des Halbkreiſes dreht ſich ein leicht beweglicher Zeiger, welcher unten mit einem Kügelchen aus Hollundermark verſehen iſt. Wenn man nun die Maſchine dreht, ſo wird anfänglich das Kügelchen des Elektrometers lebhaft abgeſtoßen; es ſteigt raſch, bleibt aber bald an einem beſtimmten Punkte des getheilten Halbkreiſes feſtſtehen, obgleich die Maſchine ſich in unausgeſetzter Thätigkeit befindet. Die Spannung auf dem Conductor erreicht alſo eine gewiſſe Grenze, welche trotz der ſteten Elektricitätsentwickelung nicht überſchritten werden kann. Der Grund liegt ohne Zweifel darin, daß der Conductor ungeachtet der guten Iſolirung doch einen fortwährenden Verluſt erleidet, welcher natürlich mit der Größe der elektriſchen Spannung in directem Verhältniß ſteht. Sobald nun die Spannung auf dem Conductor ſo groß iſt, daß der elektriſche Verluſt in jedem Zeittheilchen gleich iſt der Elektricitätsmenge, welche in derſelben Zeit dem Conductor zugeführt wird, ſo muß das Korkkügelchen ſeine Stellung faſt unverändert beibehalten, mag auch die Maſchine noch länger gedreht werden; die Grenze der Ladung iſt dann erreicht.

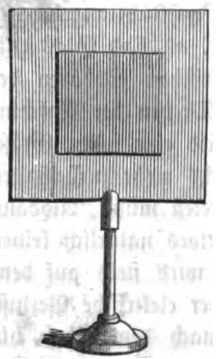
Das eben Geſagte gilt für einen poſitiv elektriſchen Conductor, weil auf dieſem eine wirkliche Anhäufung des Elektricums ſtattfindet. Der Conductor wird nach dem Früheren poſitiv elektriſch, wenn er mit dem Reibzeug in Verbindung ſteht. Im entgegengeſetzten Falle wird aber der Conductor dadurch, daß er ſein E an das Glas abgiebt, negativ elektriſirt, und das aufgeſchraubte Elektrometer zeigt die Größe des Mangels an E, nicht aber die Spannung wirklich angehäufter Elektricität. Je mehr nun der Conductor ſein E an das Glas entläßt, um ſo ſtärker drängen ſich auch die elektriſchen Sphären der umgebenden Luft zu ihm hin. Bei fortgeſetztem Drehen der Maſchine muß daher der Verluſt des Conductors an E bald eine ſolche Größe erreichen, daß die umſchließende Luft ihr E nicht mehr zurückhalten kann, ſondern zum Theil an den Conductor abtreten muß. Alsdann kann der negativ elektriſche Zuſtand des Conductors natürlich keinen höheren Grad mehr erreichen; das Elektrometer wird ſtets auf denſelben Punkt der Theilung hinweiſen, da nun der elektriſche Verluſt, welchen der Conductor in jedem Zeittheilchen nach dem Glaſe hin erleidet, gleich ſein wird der Elektricitätsmenge, welche ihm in derſelben

Digitized by Google

Zeit von der Luft zugeführt wird. Das Elektrometer giebt hier eigentlich die Größe der Spannung an, mit welcher die elektrischen Sphären der Luft nach dem Conductor hinstreben. Aus dem Vorhergehenden folgt, daß man dem Conductor bei feuchtem Wetter keine so starke negative oder positive Ladung ertheilen kann, wie in trockner Luft.

Werden dem negativ elektrisirten Conductor leitende Körper hinreichend genähert, so müssen sie ihr E nothwendig zum Theil an denselben abgeben. Wenn man sich selbst auf einen Harzkuchen oder auf einen durch Glasfüße isolirten Schemel stellt und den Körper mit dem Conductor in leitende Verbindung bringt, so sträuben sich die Haare auf dem Kopfe, während man auf der Haut, namentlich im Gesichte, ein eigenthümliches Gefühl wahrnimmt, so etwa, als ob man in ein Spinnengewebe gerathen wäre. Nähert sich der auf dem Schemel stehenden Person eine zweite, welche nicht isolirt ist, mit dem Knöchel der Hand, so springt ein Funken über, welcher einen stechenden Schmerz verursacht.

Man denke sich eine mehrere Fuß lange und mehrere Zoll weite Glasröhre, welche an ihren beiden Enden mit Metallplatten verschlossen und mit einem Hahne versehen ist, um sie luftleer machen zu können. Durch beide Fassungen gehen Messingdrähte hindurch, welche innerhalb der Röhre mit kleinen Knöpfen endigen. Wird nun das eine Ende mit dem Conductor der Maschine, das andere mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht, so erfüllt die nunmehr überströmende Elektricität den ganzen inneren Raum der Röhre mit einem lebhaften Lichte. Läßt man durch den Hahn wieder allmälig Luft einströmen, so nimmt das Licht immer mehr die Form des gewöhnlichen elektrischen Funkens an.



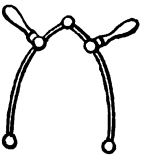
188. Die Franklin'sche Tafel besteht aus einer Glasscheibe, welche gewöhnlich auf beiden Seiten mit Staniol so belegt ist, daß das Glas nach dem Rande hin um eine gewisse Breite frei bleibt. Auch pflegt man wohl diese unbelegten Stellen, um sie besser isolirend zu machen, noch mit Firniß zu überziehen.

Man führe nun der einen Belegung, z. B. der vorderen, aus irgend einer Quelle, etwa mit Hülfe der Elektrisirmaschine, Elektricität zu, z. B. positive, während die andere Belegung mit dem Boden in leitender Verbindung steht.

Digitized by Google

Dann wirkt die auf jener Belegung sich anhäufende Elektricität durch die Glasscheibe hindurch auf das E der anderen Belegung vertheilend, so daß dieses nunmehr in den Boden strömt. Aber eben hierdurch entsteht in der hinteren Belegung freier Raum, in Folge dessen das auf der vorderen Belegung befindliche E einen Antrieb erhält, die Glasscheibe zu durchdringen, um jenen Raum auszufüllen. Das Glas aber, einer der besten Isolatoren, widersetzt sich diesem Streben des E, so daß dem letzteren nichts Anderes übrig bleibt, als die elektrischen Sphären um die Molecüle des Glases nach der hinteren Belegung zu drängen, wodurch dieselbe noch vollständiger vom E befreit wird. Weil nun der Druck des angehäuften E sich fast ganz nach der entgegengesetzten Seite des Glases hinwendet, erlangt die vordere Belegung das Vermögen, noch mehr E aus der sich darbietenden Quelle aufzunehmen. Man wird hiernach leicht erkennen, daß der negativ elektrische Zustand der hinteren Belegung um so reiner hervortreten wird, je mehr E auf der vorderen Fläche sich angehäuft hat, besonders aber, wenn dieselbe noch einiges E frei enthält; denn das übrige E ist nicht frei, sondern gebunden, insofern es kein anderes Streben hat, als die Glasscheibe zu durchdringen und auf der hinteren Belegung sich auszubreiten. Mit der Menge des freien E wächst der Druck, welcher die elektrischen Sphären des Glases nach der anderen Seite hindrängt; hierdurch zieht sich das angehäufte E größtentheils von der metallischen Belegung hinweg zum Glase hin, während die andere Belegung, eben wegen jenes Druckes, mehr und mehr verliert, so daß sie auch nicht im Stande ist, neues E durch Berührung mit einem Körper anzunehmen. Nimmt man aber das freie E der vorderen Belegung hinweg, etwa durch Berührung mit dem Finger, so wird die hintere Belegung wieder empfänglich für neues E, welches ihr gleichfalls dadurch, daß man sie mit dem Finger berührt, gegeben werden kann. Aber hiermit ist wieder auf der vorderen Belegung einiges E frei geworden, das sich hinwegnehmen läßt. Auf diese Weise kann die Tafel durch abwechselndes Berühren der einen und der anderen Belegung allmälig ganz entladen werden. Um die Entladung mit einem Male zu bewerkstelligen, hat man nur nöthig, beide Belegungen gleichzeitig zu berühren. In demselben Moment, in welchem die eine Belegung ihr freies E abgiebt, nimmt die andere E auf, die obigen einzelnen Entladungen folgen hier continuirlich auf einander, so daß sie in einem Augenblicke stattzufinden scheinen. Will man die Tafel auf einmal entladen, so bedient man sich eines sogenannten Ausladers, welcher aus zwei gebogenen, an ihren Enden mit einer kleinen Kugel ver-

Digitized by Google



sehenen Drähten besteht, an denen überdies noch eine isolirende Handhabe von Glas oder Holz angebracht ist.

Berührt man nun diejenige Belegung, welche freies +E enthält, mit der einen Kugel und nähert die andere der gegenüber befindlichen Belegung, so muß sich jenes freie E über den ganzen Ausladen verbreiten, wodurch natürlich die andere Fläche die Fähigkeit erhält, einiges E von der in der Nähe liegenden Kugel des Ausladers aufzunehmen, indem in dieser Kugel das E sich verdichtet, um in den leeren Raum der erwähnten Belegung überzugehen. Das Letztere geschieht wirklich, sobald die Kugel dieser Belegung so weit genähert wird, daß die elektrische Spannung die zwischenliegende Luftschicht durchbrechen kann. Das übergehende Elektricum erscheint dabei als Funken mit lebhaftem Lichte und einem knackenden Tone.

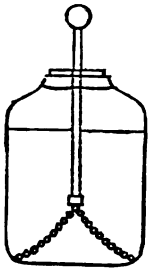
Bringt man aber die eine Kugel des Ausladers mit derjenigen Belegung in Berührung, welche kein freies E enthält, also in unserem Falle mit der negativen Belegung, während man die andere Kugel der positiven nähert, so wird das freie E der letzteren vertheilend auf das E der angenäherten Kugel wirken oder dasselbe nach jener Kugel hintreiben, welche mit der negativen Belegung in Berührung ist. Aber eben indem dies geschieht, läßt der Druck, welcher von der positiven nach der negativen Belegung hin gerichtet ist, nach, die letztere nimmt einiges E von der mit ihr in Berührung stehenden Kugel des Ausladers an, wodurch der Druck nach dieser Seite hin noch mehr geschwächt wird. Die Repulsion zwischen den Elementen des E auf der positiven Belegung wendet sich nunmehr vorzugsweise der angenäherten Kugel zu, deren E nach der anderen Kugel hingetrieben ist; bei hinreichender Annäherung jener Kugel erfolgt auch hier der Uebergang des Elektricums und damit die Entladung der Tafel.

Wenn man eine entladene Tafel eine Zeit lang stehen läßt, so giebt sie einen zweiten, schwächeren Entladungsschlag. Es rührt dies nach dem Obigen daher, daß die Elektricität nicht blos auf der metallischen Belegung bleibt, sondern auch zum Theil auf die Oberfläche des Glases übergeht.

Ueberschreitet die Anhäufung des E auf der einen Belegung, namentlich wenn die Luft sehr trocken ist, eine gewisse Grenze, so dringt das E mit Gewalt in das Glas ein und zertrümmert dasselbe in dem Moment, wo die Repulsion zwischen den Elementen des eindringenden E und den elektrischen Sphären des Glases selbst ihren höchsten Grad erreicht hat.

Digitized by Google

189. Die Leidner Flasche ist nur der Form nach von der Franklin'schen Tafel verschieden. Gewöhnlich gebraucht man eine dünne Glasflasche, welche von innen und außen bis auf einen einige Zoll breiten Rand unter dem Halse mit Staniol belegt und deren Mündung durch einen Kork verschlossen ist. Den nicht belegten Theil der Flasche pflegt man noch mit Firniß zu überziehen. Durch den Kork ist ein Metalldraht gesteckt, welcher mit seinem unteren Ende in genauer metallischer Berührung mit der Belegung des Bodens ist und oben in einer kleinen Kugel endigt, die, wenn man die Flasche laden will, mit irgend einer Elektricitätsquelle, z. B. mit dem Reibzeug oder Conductor einer Elektrisirmaschine, verbunden wird, während die äußere Belegung mit dem Erdboden in leitender Verbindung steht. Beide Belegungen werden dann entgegengesetzt elektrisch. Anstatt die innere Seite des Gefäßes mit Staniol zu belegen, kann man dasselbe auch mit einer leitenden Substanz, z. B. mit Eisenfeile oder Schrotkörnern, füllen.



Die Erscheinungen der Leidner Flasche lassen sich nun ganz auf dieselbe Weise erklären, wie jene der Franklin'schen Tafel. Auch hier findet eine Anhäufung des E auf der einen, gleichwie oben auf der inneren oder äußeren, Belegung und damit auch jener Druck statt, welchen die elektrischen Sphären des Glases empfangen und auf die andere Belegung übertragen. Das auf der letzteren befindliche E muß dann in den Boden entweichen. Hiermit ist die Flasche geladen und kann wie die Franklin'sche Tafel wieder entladen werden; auch aus ihr läßt sich nach einiger Zeit noch ein zweiter, schwächerer Schlag erhalten, ganz aus demselben Grunde, wie bei der Franklin'schen Tafel. Um sehr starke Ladungen hervorzubringen, verbindet man mehrere Flaschen zu einer sogenannten elektrischen Batterie. Dies geschieht dadurch, daß man alle inneren Belegungen unter sich und eben so alle äußeren mit einander in leitende Verbindung bringt. Außerdem sind die Erscheinungen einer solchen Batterie von denen einer einfachen Flasche nicht verschieden.

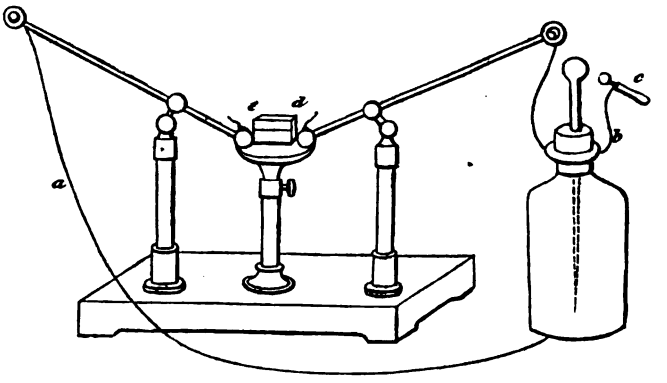
Faßt man mit der einen Hand die äußere Belegung, mit der andern aber den Kopf der Flasche an, so entladet sich die letztere durch den eigenen Körper, wobei man eine Erschütterung in den Vorderarmen und bei sehr starken Ladungen auch in den Gelenken beider Arme mit heftigem Schmerze in der Brust empfindet. Es ist leicht einzusehen, warum in dem Falle, wo man beide Belegungen einer Tafel

Digitized by Google

oder Flasche berührt, die Wirkung auf den Körper stärker ist, als bei einem gewöhnlichen elektrischen Funken. Wenn die Hand einen gewöhnlichen Funken empfängt oder abgiebt, so stellt sich das elektrische Gleichgewicht sehr schnell wieder her, während in jenem Falle die Störung dieses Gleichgewichtes viel bedeutender und daher auch die Erschütterung des Körpers bei Weitem stärker ist, weil der letztere in einem und demselben Augenblick auf der einen Seite E verliert und auf der anderen solches gewinnt. Den elektrischen Erschütterungsschlag können mehrere Personen zugleich empfinden, wenn sie einander die Hände geben und die erste den Knopf, die letzte aber die äußere Belegung der Flasche berührt. Ist nun der Knopf positiv, die äußere Belegung dagegen negativ elektrisch, so erhält die erste Person Elektricum, während die letzte in demselben Moment eben so viel, als jene gewonnen, abgiebt, womit das elektrische Gleichgewicht auch in allen übrigen Personen aufgehoben ist. Jede Person, von derjenigen an gerechnet, welche den Verlust an E durch die Flasche erlitten hat, setzt sich in's Gleichgewicht mit der unmittelbar folgenden, indem sie von derselben so viel E aufnimmt, als sie an die vorhergehende abgegeben hat, bis zu jener fort, welche den Knopf der Flasche berührt.

Wenn eine Flasche isolirt steht, so sieht man leicht, daß sie sich entweder gar nicht oder doch nur sehr schwach laden läßt. Denn da das E auf der einen Belegung an der Entweichung verhindert ist, so kann auf der anderen Belegung unmöglich eine Anhäufung des E stattfinden.

Zu vielen Versuchen, welche sich auf den Entladungsschlag der Leidner Flasche oder der elektrischen Batterie insbesondere beziehen, gebraucht man Henley's sogenannten allgemeinen Ausladen, dessen Einrichtung aus der Figur leicht begreiflich ist. Der eine Arm desselben steht durch den Draht a mit der äußeren, der andere durch



Digitized by Google

den Draht b, welcher sich in einer Kugel endigt, mit der inneren Fläche einer Leidener Flasche in Verbindung. Um die Flasche zu entladen, nähert man mittelst des isolirenden Handgriffes c die letzterwähnte Kugel dem Knopfe der Flasche; der Funken schlägt auf diese Kugel und dann zwischen den beiden Kugeln d und e über. Bringt man zwischen die letzteren einen dünnen Eisendraht, so wird er durch einen schwachen Schlag erwärmt, durch einen stärkeren rothglühend gemacht und durch einen starken selbst geschmolzen und in kleinen Kügelchen umhergeschleudert. Aehnliches gilt von anderen Metallen, jedoch mit dem Unterschiede, daß die schlechter leitenden bei gleichen Dimensionen weit stärker erwärmt werden als die besseren Leiter unter ihnen. Wenn man einen Streifen Blattgold zwischen zwei Glasplatten legt und diese zusammenpreßt, so wird durch den elektrischen Schlag das Gold in's Glas geschmolzen. Brennbare Flüssigkeiten und Schießpulver können durch den Entladungsschlag entzündet werden. Wenn man zwischen die beiden Kugeln des Ausladers einen schlechten Leiter, wie eine Holzscheibe von 4—5 Zoll Durchmesser und 3—5 Linien Dicke oder mehrere Kartenblätter bringt, so werden sie zertrümmert oder durchlöchert.

Auf der Oberfläche mancher Körper läßt der elektrische Funken einen Lichtschweif zurück, welcher mitunter längere Zeit andauert. Auf Kreide hat dieses phosphorische Licht eine rothe oder violete, auf Zucker und krystallisirtem Kalkspath eine grünliche Färbung.

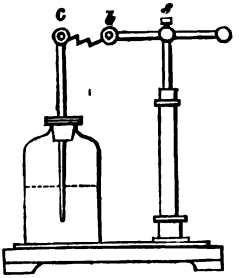
Wenn das Elektricum durch eine Flüssigkeit hindurchschlägt, so wird dieselbe in der Regel mit großer Gewalt umhergeschleudert. Die Ausdehnung der Flüssigkeit ist so stark, daß selbst die stärksten Glasröhren dadurch zersprengt werden. Man kann hierüber einen Versuch anstellen, wenn man eine mit Wasser angefüllte Glasröhre an beiden Enden mit Korkstopfen verschließt, durch welche Drähte hindurchgehen, zwischen denen man den Funken überschlagen läßt. Auch die Luft wird beim Ueberspringen des Funkens stark ausgedehnt, wovon man sich wie vorher überzeugt, wenn man in einen Glascylinder von den beiden Enden her Metalldrähte führt, zwischen denen der Funken überschlagen muß. An der Seite des Cylinders befindet sich ein mit ihm communicirendes Glasröhrchen, welches mit einer gefärbten Flüssigkeit zum Theil gefüllt ist. Durch die Ausdehnung der Luft wird nun die letztere im Röhrchen gehoben, so daß man aus der Höhe des Steigens die Größe der Luftausdehnung erkennen kann. Hierauf beruht Kinnerley's elektrisches Thermometer.

Die Gesetze der Erwärmung dünner Drähte bestimmte Rieß

Digitized by Google

vermittelst eines Luftthermometers, durch dessen Kugel ein dünner Platinadraht hindurchging. Er fand, daß die Erwärmung eines Drahtes mit dem Quadrate der Elektricitätsmenge, mit welcher die Batterie geladen ist, in directem und mit der Oberfläche, worauf sich die Elektricität vertheilt, im umgekehrten Verhältnisse steht. Die in Drähten von demselben Metall frei werdenden Wärmemengen verhalten sich unter sonst gleichen Umständen umgekehrt wie die Querschnitte derselben.

Um die Stärke der Ladung einer Flasche zu messen oder auch um Wirkungen von bestimmter Größe hervorzubringen, bedient man sich einer Vorrichtung von Lane. Auf dem Fußgestelle, worauf die Flasche steht, erhebt sich ein verticaler Stab, der oben ein horizontales, mit zwei Kugeln versehenes Messingstäbchen trägt.



Vermittelst der Schraube s läßt sich die Kugel b dem Knopfe der Flasche beliebig nähern, und da das Stäbchen eingetheilt ist, so kann man auch stets die Entfernung der beiden Kugeln von einander genau bestimmen. Durch den verticalen Stab steht das horizontale Stäbchen mit der äußeren Belegung der Flasche in Verbindung. Die Stärke der Ladung ergiebt sich aus der Entfernung der Kugeln b und c, bei welcher die Flasche sich selbst entladet. Diese Entfernung nennt man gewöhnlich die Schlagweite der Flasche, welche nach Harris und Rieß der Dichtigkeit der angehäuften Elektricität proportional ist.

Rieß bestimmte mit Hülfe der Lane'schen Flasche auch die Quantität der Elektricität, mit welcher eine Batterie geladen wird. Die Batterie wurde auf ein Gestelle, welches durch Glasfüße isolirt war, gesetzt, ihre äußere Belegung mit der inneren Belegung der Lane'schen Flasche und die innere Belegung der letzteren mit einer großen Metallmasse in leitende Verbindung gebracht. Hierauf führte er der Batterie durch den Conductor einer Elektrisirmaschine Elektricität zu, welche das E der äußeren Belegung nach der inneren Belegung der Lane'schen Flasche hintrieb, wodurch diese geladen wurde. Sobald die Ladung eine gewisse Grenze erreicht hatte, erfolgte eine Entladung der Lane'schen Flasche. Man sieht nun, daß bei jeder Entladung der letzteren eine gleiche Quantität des E von der äußeren Belegung der Batterie herbeigekommen sein mußte; eben so oft war aber auch die Ladung der Batterie um eine gleiche Elektricitätsmenge vermehrt worden, so daß jene offenbar der Anzahl der Selbstentladungen der Lane'schen Flasche proportional ist.

Digitized by Google

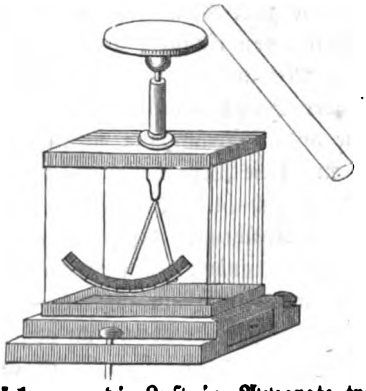
190. Auf demſelben Princip, wie die vorerwähnten Apparate, beruht auch der Condenſator, welcher gebraucht wird, um kleine Mengen der Elektricität zu verdichten und dadurch wahrnehmbar zu machen. Er beſteht im Allgemeinen aus zwei Metallplatten, welche durch irgend eine nicht leitende Luftſchicht von einander getrennt ſind. Gewöhnlich legt man auf eine runde Metallplatte, nahe am Rande derſelben, drei kleine Glasſtückchen oder Siegellackkörnchen in gleicher Entfernung von einander, worauf die andere Metallplatte mittelſt einer iſolirenden Handhabe geſetzt wird. Auf dieſe Weiſe befindet ſich zwiſchen beiden Platten eine nichtleitende Luftſchicht. Bringt man nun die eine Metallplatte mit dem Körper in Berührung, deſſen Elektricität man ſammeln will, während man auf die andere einen Finger legt, ſo wird die letztere durch Vertheilung, wenn auch nur ſchwach, elektriſch. Denn iſt z. B. die jener Platte mitgetheilte Elektricität poſitiv, ſo übt ſie bekanntlich durch die Luftſchicht hindurch einen Druck auf das E der zweiten Platte aus, welches dadurch zurückgetrieben und in den dargebotenen Finger zu entweichen genöthigt wird. Dies macht aber die zweite Platte negativ elektriſch und die Folge davon iſt, daß ſich jener Druck ganz nach ihr hin richtet, weil er hier am wenigſten Widerſtand findet. Das E der erſten Platte flieht alſo nach derjenigen Fläche, welche der zweiten gerade zugekehrt iſt, wodurch jene zugleich die Eigenſchaft erlangt, noch mehr E vom Körper aufzunehmen. So lange nun die erſte Platte nach der bisherigen Weiſe auf der zweiten ruht, kann ſich das in ihr verdichtete E des Körpers nicht frei äußern, weil es nur das Beſtreben hat, in die zweite überzugehen, was freilich die iſolirende Luftſchicht nicht geſtattet; hebt man ſie aber vermittelſt des iſolirenden Handgriffes auf, ſo wird das angeſammelte E frei, wie ſich an einem Elektroſkope leicht nachweiſen läßt.

Wenn dagegen die obere Platte mit einem negativ elektriſchen Körper berührt wird, ſo theilt ſie ihm einiges E mit, wodurch die Elektricität der unteren Platte veranlaßt wird, ſich nach der oberen hinzuwenden. Hiermit erlangt die untere Platte zugleich die Fähigkeit, einiges E von dem aufgelegten Finger anzunehmen; ſie iſt nun vermöge des von ihr ausgehenden Druckes um ſo mehr im Stande, das E der oberen Platte in den Körper zu treiben oder dieſe Platte ſelbſt negativ zu elektriſiren. Entfernt man jetzt die letztere Platte von der anderen, ſo läßt ſich der negativ elektriſche Zuſtand derſelben und daher auch derjenige des Körpers mit Hülfe eines Elektroſkopes prüfen.

Zweckmäßig verbindet man den Condenſator mit einem Elektrometer, an dem man die Elektricität eines Körpers nicht allein ſichtbar

Digitized by Google

machen, sondern auch ungefähr der Größe nach abschätzen kann. Ein solches Elektrometer zeigt nachstehende Figur. Durch den Deckel des Gefäßes geht ein Messingstab, welcher oben eine Kugel oder eine Messingplatte trägt, während an seinem unteren Ende zwei Streifen aus Blattgold herabhängen. Das Gefäß besteht aus Platten von Spiegelglas, welche an den Kanten luftdicht verkittet sind. Unten am Boden befindet sich eine Schieblade, welche durch eine Oeffnung mit dem innern Raume communicirt, außerdem aber sehr dicht schließt. In dieser Schieblade liegen einige Chlorcalciumstücke, um die Luft im Apparate trocken zu erhalten. Will man nun die elektrische Natur eines Körpers mit Hülfe dieses Apparates untersuchen, so ist zunächst erforderlich, daß man ihm eine bestimmte Elektricität mittheilt, was dadurch geschieht, daß man ihm einen positiv oder negativ elektrisirten Körper nähert, während man die Platte mit dem Finger berührt. Auf diese Weise wird das Elektrometer geladen, so daß die Blättchen nunmehr, wenn man den Finger hinwegzieht, auseinander fahren, weil sie beide entweder positiv oder negativ elektrisirt sind. Wird jetzt dem geladenen Apparate ein elektrischer Körper genähert, so wird die Divergenz der Goldblättchen vergrößert oder vermindert, je nachdem der elektrische Zustand des Körpers mit dem der Blättchen gleichnamig oder ungleichnamig ist.



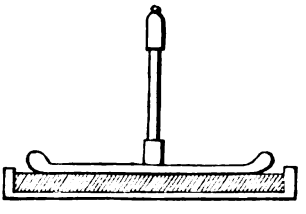
Bringt man nun über die Platte des Elektrometers eine zweite, ganz ähnliche, so hat man einen vollständigen Condensator. Den Körper, dessen Elektricität untersucht werden soll, bringt man hier mit der erst erwähnten Platte in Berührung, während man die andere ableitend mit dem Finger berührt. In Folge dessen wird jene Platte und daher auch das Elektrometer selbst auf die schon erläuterte Weise geladen. Gewöhnlich schraubt man auf das Goldblattelektrometer eine Metallplatte, welche möglichst eben abgeschliffen und auf ihrer oberen Fläche mit Schellackfirniß überzogen ist. Auf dieselbe Weise wird die andere Platte behandelt und dann mit ihrer gefirnißten Fläche auf die erste gesetzt, so daß beide Platten durch eine dünne Firnißschicht von einander getrennt sind. Natürlich ist hier die Wirkung im Wesentlichen dieselbe, wie in dem zuerst betrachteten

Digitized by Google

Falle, wo die Platten durch eine Luftschicht von einander getrennt waren.

Die auf das Elektrometer geschraubte Platte nehme nun von einem Körper unter Mitwirkung der anderen Platte die Elektricitätsmenge $+A$ auf und durch diese werde in der anderen Platte die Menge $-mA = B$ angehäuft, wo m ein Bruch ist, der wegen der Entfernung der beiden Platten nothwendig kleiner als die Einheit ist. Durch B wird aber rückwärts in der ersten Platte die Elektricitätsmenge $+mB$ oder, wenn man für B seinen Werth setzt, die Menge $+m^2A$ außer Wirksamkeit gesetzt oder gebunden. Die Menge der freien Elektricität in der Elektrometerplatte beträgt also noch $A - m^2A$, eine Größe, welche offenbar der Quantität C gleich ist, welche die Platte für sich, ohne Einfluß der anderen, vom Körper aufnehmen kann. Aus $C = A - m^2A$ ergiebt sich $\frac{A}{C} = \frac{1}{1-m^2}$ für die condensirende Kraft des Apparates.

191. Das Elektrophor, einer der interessantesten elektrischen Apparate, besteht aus einem dünnen Harzkuchen, welcher auf beiden Seiten, wie das Glas der Franklin'schen Tafel, mit Metallplatten belegt ist. Gewöhnlich gießt man aber den Harzkuchen in eine metallene Schüssel, so daß nur die Metallplatte, welche auf dem Kuchen liegt, freie Beweglichkeit in der Art behält, daß sie vermittelst seidener Schnüre oder eines Glasstabes isolirt auf den Kuchen gesetzt und wieder davon abgehoben werden kann. Die metallische Unterlage des Kuchens pflegt man die Form, die bewegliche Metallplatte aber den Deckel zu nennen. Man sorgt dafür, daß sowohl der Harzkuchen, als auch die untere Fläche der Metallplatte, welche auf ihn zu liegen kommt, möglichst eben ist. Die beste Masse zu dem Kuchen besteht aus 8—10 Theilen Schellack und 1 Theil venetianischem Terpentin.



Man mache nun den Kuchen auf seiner Oberfläche durch Reiben oder durch Schlagen mit einem Fuchsschwanze oder Katzenfelle positiv elektrisch, während die Form mit dem Boden in leitender Verbindung steht. Alsdann wirkt der Druck des auf der Oberfläche sich ansammelnden E zum Theil durch die elektrischen Sphären des Harzes hindurch auf die Elektricität der Form, die nach der dem Kuchen entgegengesetzten Fläche und von da in den Boden entweicht. Hierdurch

Digitized by Google

wird es möglich, daß sich auf der Oberfläche des Harzes eine größere Menge E ansammelt, als außerdem geschehen würde. Setzt man nun den isolirten Deckel auf den Kuchen, so muß seine obere Fläche mit diesem gleichnamig, d. h. positiv elektrisch und seine untere negativ elektrisch werden, weil das auf der Oberfläche des Kuchens angehäufte E die Elektricität des Deckels von der unteren nach der oberen Fläche treibt. Hier giebt sie sich sogleich als freie zu erkennen, wenn man einen Finger hinreichend nähert, indem sie auf diesen als Funken überschlägt. Hat man dem Deckel auf solche Weise das freie E entzogen, so ist die natürliche Folge davon, daß sich der Druck des auf der Oberfläche des Kuchens verbreiteten E ganz dem Deckel zuwendet, da er hier den geringsten Widerstand findet. Zugleich wird hierdurch der untere Theil des Harzkuchens negativ elektrisch, weil sich die elektrischen Sphären des Harzes wegen der Fortpflanzung jenes Druckes auf den Deckel nach der oberen Fläche hindehnen. Dieser negativ elektrische Zustand der unteren Harzfläche kann aber nicht ohne Einfluß auf das E der Form sein, welches vielmehr dadurch veranlaßt wird, die dem Kuchen zugekehrte Fläche einzunehmen, womit die untere Fläche der Form negativ elektrisch und zugleich fähig wird, einiges E aus dem Boden aufzunehmen, falls sie mit diesem in leitender Verbindung steht. Natürlich kann dann die Form selbst kein freies E mehr zeigen.

Noch ehe dem Deckel sein freies + E entzogen worden ist, läßt sich die untere Fläche des Harzes als negativ elektrisch betrachten, indem der Druck, welcher von der oberen Fläche ausgeht, dadurch, daß er sich auf den Deckel fortpflanzt, nach der entgegengesetzten Seite hin geschwächt wird. Gleichwohl übt das E des Deckels einen Gegendruck aus, welcher verhindert, daß der negativ elektrische Zustand der unteren Harzfläche deutlich hervortritt, was erst dann geschehen kann, wenn man dem Deckel sein freies + E durch die Berührung mit dem Finger entzogen hat. Berührt man aber mit einem Finger den Deckel und gleichzeitig mit einem anderen die Form, so erhält man aus bekannten Gründen einen stärkeren Schlag, als wenn man den Deckel allein berührt hätte. Hebt man den Deckel, nachdem er durch einfache Berührung mit dem Finger oder auf die letzterwähnte Weise sein freies + E verloren hat, vom Kuchen auf, so zeigt er sich durchweg negativ elektrisch und ist daher im Stande, dem angenäherten Finger lebhafte Funken zu entlocken.

Bei allen diesen Processen verliert der Kuchen, sofern seine Oberfläche hinreichend eben ist, nichts von seiner Elektricität, indem er

Digitized by Google

nur durch Fortpflanzung der Spannung wirkt, welche das auf ihm angehäufte E gegen die Umgebung ausübt. Mittheilung des E findet ſtatt, wenn der Kuchen auf ſeiner Oberfläche Hervorragungen beſitzt, an welchen ſich das E, wie wir wiſſen, dergeſtalt verdichtet, daß es nothwendig ausſtrömen muß, entweder in den Deckel oder in die Luft, namentlich wenn letztere feucht iſt. Hierdurch verliert der Apparat bald ſeine Wirkſamkeit.

Das Princip der Erklärung bleibt daſſelbe, wenn man den Kuchen, anſtatt poſitiv, durch Entziehung von E negativ elektriſirt, oder wenn man ſtatt des Harzkuchens eine dünne Glasſcheibe nimmt, welche auf ihrer Oberfläche durch Reiben mit einem almalgamirten Leder negativ elektriſch wird.

192. Die Entladung einer Franklin'ſchen Tafel oder einer Batterie geſchieht dem Anſcheine nach ohne den geringſten Zeitverluſt. Der längſte Draht ſcheint von dem elektriſchen Schlage im untheilbaren Augenblicke durchlaufen zu werden, ohne etwas von ſeiner Stärke zu verlieren. Watſon konnte ſelbſt an einer 4 engliſche Meilen langen Leitung keine Spur einer ſucceſſiven Fortpflanzung der Elektricität entdecken. Indeſſen hat Wheatſtone einen intereſſanten Verſuch angeſtellt, aus dem ſich die Geſchwindigkeit, mit welcher die Elektricität einen langen Metalldraht durchläuft, beurtheilen läßt.

Man denke ſich drei leuchtende Punkte, welche ſich in einer geraden, horizontalen Linie befinden, und einen kleinen Planſpiegel, der um eine der vorerwähnten Linie parallele Are ſehr ſchnell gedreht werden kann. So lange nun dieſer Spiegel ruhig ſteht, erblickt das Auge in ihm jene drei Punkte nebeneinander in gerader Linie; wird dagegen der Spiegel mit hinlänglicher Geſchwindigkeit gedreht, ſo ſieht man ſtatt der Punkte drei Lichtſtreifen, weil bekanntlich der Lichteindruck an alle den Stellen, welche das Bild eines Punktes nach und nach durchläuft, noch eine Zeit lang im Auge nachwirkt.

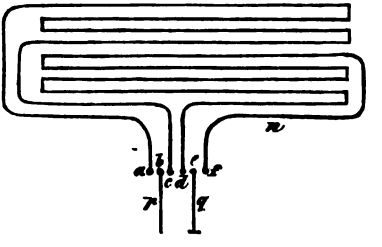
Denkt man ſich nun in der Richtung der horizontalen Linie einen langen Kupferdraht, welcher an den Stellen, welche jene drei Punkte einnehmen, unterbrochen iſt, ſo muß, wenn man eine Leidner Flaſche durch ihn entladet, an jeder dieſer Stellen ein Funken überſpringen. Auch die Bilder dieſer Funken müſſen bei raſcher Rotation des Spiegels in die Länge gezogen erſcheinen, ſofern die Funken ſelbſt nur die geringſte Dauer beſitzen. Die Länge des Bildes wird um ſo bedeutender ſein, je länger der Funken dauert und je ſchneller man den Spiegel dreht. Wenn aber einer dieſer Funken ſpäter eintritt, als die beiden anderen, ſo muß ſein Bild gegen die Bilder der

Digitized by Google

letzteren um etwas nach der Richtung der Drehung des Spiegels verschoben erscheinen.

Denken wir uns den Spiegel an einem rotirenden Apparate so befestigt, daß er 800 Umdrehungen in 1 Secunde macht, so wird er, um einen Bogen von 1° zu durchlaufen, $\frac{1}{360 . 800}$ und mithin, um einen Winkel von ½° zu beschreiben, $\frac{1}{2 . 360 . 800}$ = $\frac{1}{576000}$ Secunde nöthig haben. Da aber die Winkelgeschwindigkeit des Bildes doppelt so groß ist als die des Spiegels, wie sich leicht nach Seite 245 ergiebt, so legt das Bild in $\frac{1}{2 . 576000}$ Secunde einen Bogen von ½° zurück. Hieraus folgt also, daß, wenn der elektrische Funken nur eine Dauer von $\frac{1}{1152000}$ Secunde hat, er um einen halben Grad verlängert erscheinen muß. Dies ist beinahe eine Länge, in welcher 1 Zoll in einer Entfernung von 10 Fuß erscheint.

Auf einem Brette waren nun 6 Metallkugeln a, b, c, d, e, f wohl isolirt befestigt. Von der Kugel b führte ein Draht p zur innern Belegung einer Leidner Flasche, von der Kugel a aber ein solcher in vielen Windungen zur Kugel c. Die Entfernung beider Kugeln betrug 0,1 Zoll. Von der Kugel d führte wieder ein vielfach gewundener Draht zur Kugel f, welche gleichfalls in einer Entfernung von 0,1 Zoll der Kugel e gegenüber lag. Von der letzteren ging endlich ein Draht q zur äußeren Belegung der Flasche. Die 6 Kugeln des Brettes lagen sämmtlich in einer horizontalen Linie. Die Länge der Drahtwindungen zwischen a und c betrug ¼ engl. Meile und eben so lang war der Draht zwischen den Kugeln d und f.



Zehn Fuß vom Brette entfernt wurde nun der Apparat mit dem rotirenden Spiegel befestigt und der letztere in eine rasche Umdrehung versetzt, während zugleich die Flasche entladen wurde. Alsdann erblickte man im Spiegel drei Funkenbilder, welche alle in die Länge gezogen erschienen, nur war das mittlere gegen die äußeren etwas verrückt. Die Bilder zeigten nämlich die Gestalt ⚌ oder ⚍, je nachdem sich der Spiegel von der Rechten zur Linken oder im entgegengesetzten Sinne drehte.

Digitized by Google

Hieraus folgt nun dem Obigen gemäß einmal, daß, wenn der Entladungsdraht sehr lang ist, keine momentane, sondern eine successive Entladung stattfindet, und zweitens, daß die beiden äußeren Funken gleichzeitig erscheinen.

Wir wollen annehmen, die innere Belegung der Flasche sei positiv, die äußere dagegen negativ elektrisch. Während nun das E der inneren Belegung nach der Kugel b des Drahtes p sich bewegt, zieht sich das E des vielfach gewundenen Drahtes n nach der Kugel f hin, um von dieser nach der Kugel e des Drahtes q, welcher zur äußeren Belegung führt, überzuspringen. Springt also ein Funken von b nach a, so schlägt auch in demselben Moment ein solcher von f nach e über. Die beiden äußeren Funken erscheinen mithin vollkommen gleichzeitig. Indem aber das Elektricum des Drahtes zwischen d und f sich nach der Kugel f bewegt, um von da nach e überzuspringen, entstand für das E des Drahtes zwischen a und c die Veranlassung, sich zum Theil nach der Kugel c hin zu begeben. Der von b nach a übergegangene Funken breitet sich nun längs des letzterwähnten Drahtes aus und nöthigt das in der Kugel c schon angesammelte E zum Ueberspringen nach d, um den Mangel von E in dem Drahte, welcher die Kugeln d und f mit einander verbindet, aufzuheben. Daher ist der mittlere Funken, welcher zwischen c und d überspringt, nothwendig der letzte.

Oben haben wir gesehen, daß der elektrische Funken, wenn er auch nur einen Bestand von $\frac{1}{1152000}$ Secunde hat, doch um $\frac{1}{2}^0$ verlängert erscheinen muß. Die Verschiebung des mittleren Funkenbildes gegen die äußeren betrug nun ungefähr $\frac{1}{2}^0$, woraus folgt, daß der mittlere Funken beinahe um $\frac{1}{1152000}$ Secunde später erschien als die beiden äußeren. Da nun das elektrische Fluidum in dieser Zeit beinahe $\frac{1}{4}$ englische Meile durchlaufen hatte, so ergiebt sich, daß es in 1 Secunde etwa einen Weg von $\frac{1152000}{4} = 288000$ englischen oder 62000 deutschen Meilen zurücklegt.

Drittes Kapitel.

Von der atmosphärischen Elektricität.

193. Den Beobachtungen zufolge ist sowohl bei bedecktem als bei wolkenlosem Himmel immer einige freie Elektricität in der Luft

Digitized by Google

vorhanden. Bei heiterer, reiner Atmosphäre soll sie meist positiv, bei trüber und während eines Regens negativ, jedoch nicht selten auch positiv sein. Um den elektrischen Zustand der Atmosphäre zu prüfen, errichtet man auf dem Gipfel eines Gebäudes eine isolirte, zugespitzte Eisenstange von 25—30 Fuß Länge und verbindet sie durch eine Kette oder einen Draht mit einem guten Elektrometer.

Wenn nun eine solche Stange in die wolkenlose Atmosphäre hineinragt, so muß sie einen Theil derjenigen Elektricität, welche sie enthält, entlassen; denn die letztere findet daselbst weniger Widerstand, sich den elektrischen Sphären der Luft anzuschließen, als in den unteren Schichten, wo die Aufregung größer ist. Jeder Körper, in dem das Elektricum einmal angehäuft gewesen, hält noch einen Rest positiver Elektricität zurück, weil die Repulsion, um derentwillen das E den Körper verlassen muß, immer schwächer wird, je mehr sich der Zustand des Körpers dem elektrischen Gleichgewichte mit der Umgebung nähert. Wird daher eine Stange, welche sich hinsichtlich der unteren Schichten der Atmosphäre im natürlichen Zustande befindet, hoch aufgerichtet, so ist das elektrische Gleichgewicht aufgehoben, weil das E in den oberen Schichten der Luft mehr gebunden ist, und deshalb die Metallstange veranlaßt wird, sich von einem Theil des ihr inwohnenden Elektricums zu befreien. Man sieht nun, daß die Luft bei wolkenlosem Himmel nicht positiv im eigentlichen Sinne, sondern vielmehr negativ elektrisch ist und zwar um so mehr, je höher man kommt. Becquerel befestigte auf dem St. Bernhard einen langen, feinen Goldlahnfaden mit dem einen Ende an ein empfindliches Elektrometer und mit dem anderen an einen Pfeil, welcher mittelst eines Bogens abgeschossen wurde. Je höher nun der Pfeil über der Erde hinflog, desto mehr zeigte das Elektrometer positive oder in unserem Sinne negative Elektricität an. Reibung konnte nicht wohl die Ursache der letzteren sein, weil man nichts von ihr wahrnahm, wenn der Pfeil in einer gewissen Höhe über der Erde horizontal abgeschossen wurde. Im Winter ist dieser negativ elektrische Zustand der Luft bei gleicher Heiterkeit des Himmels bedeutender als im Sommer.

Den elektrischen Zustand der höheren Luftregionen, namentlich der Wolken, erfährt man wohl am sichersten nach Franklin und Romas durch einen Drachen, dessen Gerüppe mit einigen Metallspitzen und dessen Schnur ihrer ganzen Länge nach mit einem feinen Metallfaden versehen ist.

194. Unsere früheren Betrachtungen über die Elektricität führen zu dem Schlusse, daß bei allen Formveränderungen der Körper elektrische

Digitized by Google

Processe stattfinden müssen, wie dies die Erfahrung auch mehr oder weniger bestätigt. Nach Pouillet's Versuchen wird durch die Verdunstung des Wassers, wenn es Salze oder andere fremde Stoffe gelöst enthält, immer Elektricität entwickelt. Nach den Beobachtungen von Armstrong ist der Dampf, welcher aus dem Sicherheitsventil eines Dampfkessels mit Heftigkeit hervorströmt, positiv, dagegen der Kessel selbst negativ elektrisch, oder nach unserer Bezeichnungsweise umgekehrt der Dampfkessel positiv, der Dampfstrahl aber in Wahrheit negativ elektrisch. Es ist dies leicht einzusehen. Das Wasser ist in unmittelbarer Berührung mit einem Metalle, d. h. mit einem guten Leiter der Elektricität, und muß schon deshalb geneigt sein, das ihm inwohnende Elektricum zum Theil an das Metall abzutreten. Durch Einwirkung der Wärme bildet sich Dampf, welcher einen bedeutenden Druck auf das zurückbleibende Wasser ausübt, wodurch das E des letzteren noch mehr veranlaßt wird, sich nach dem Metalle zu begeben, während es sonst Sphären um die Molecüle des entweichenden Wassers gebildet haben würde. Daher konnte Armstrong einer Locomotive, welche auf eine isolirende Unterlage gestellt war, kräftige Funken entziehen, wenn der negativ elektrische Zustand des ausströmenden Dampfes durch Zuleitung aus dem Boden gehörig aufgehoben wurde.

Armstrong wurde hierdurch veranlaßt, eine großartige, sogenannte Hydroelektrisirmaschine zu construiren. Dieselbe besteht im Wesentlichen aus einem durch vier Glasfüße isolirten Dampfkessel, welcher 44 Centimeter im Durchmesser hat und 96 Centimeter lang ist. Oben auf dem Kessel befindet sich ein Hut, auf welchem ein kurzes, durch einen Hahn verschließbares Messingrohr befestigt ist. Auf das letztere wird ein gußeisernes Rohr aufgeschraubt, aus dem der Dampf durch sechs horizontale Röhren ausströmt. Diese Röhren gehen durch einen mit kaltem Wasser gefüllten Kasten aus Messingblech, wodurch ein Theil des die Röhren durchströmenden Dampfes verdichtet wird, was die Wirkung sehr verstärken soll. Der entweichende Dampf und der Kessel sind nun immer entgegengesetzt elektrisch. Um die Elektricität des Dampfes gehörig abzuleiten, bringt man in den Dampfstrom eine Reihe von Metallspitzen, welche an einem messingenen Stabe befestigt sind und mit dem Boden in leitender Verbindung stehen. Da dieser Stab auf einem Glasfuße steht, so kann man ihn jederzeit isoliren, um die Natur der Elektricität des Dampfes nachzuweisen. Der elektrische Zustand des Dampfes oder Kessels ist positiv oder negativ, je nach dem Stoffe, aus welchem die Dampfmündung gebildet ist. Besteht die letztere aus Metall, Glas oder Holz, so ist der Kessel

Digitized by Google

positiv, der Dampf negativ elektrisch. Bei einer elfenbeinernen Röhre zeigt der Kessel eine nur sehr geringe Ladung. Bringt man etwas Terpentinöl in die Ausströmungsröhre, so wird der Kessel auf einige Zeit negativ elektrisch, was auch, aber auf längere Zeit, durch fette Oele bewirkt werden kann.

Aus diesen Umständen läßt sich entnehmen, daß die elektrischen Zustände der genannten Maschine ihren Grund vorzugsweise in der Reibung der Dampftheilchen an den Wänden der Ausströmungsröhren haben. Aber man sieht auch leicht, daß sich aus den elektrischen Erscheinungen dieser Maschine kein gültiger Schluß auf die Elektricitätsentwickelung bei der Verdunstung des Wassers in der freien Natur ziehen läßt, da die Umstände so wesentlich verschieden sind.

Ohne Zweifel ist die Verdunstung die Hauptquelle der atmosphärischen Elektricität. Möglich ist auch, daß der Atmosphäre einige Elektricität durch die Pflanzen zur Zeit ihrer Vegetation zugeführt wird.

195. Hat das Elektricum um die Elemente oder Molecüle der Materie Sphären gebildet, so müssen dieselben nothwendig Veränderungen erleiden, sobald jene Molecüle sich bei der Formveränderung des Körpers auf andere Weise gruppiren. Bei der Verdunstung des Wassers werden nun durch Einwirkung der Wärme die Wassermolecüle von einander getrennt, wodurch dem Elektricum Gelegenheit gegeben wird, größere Sphären um dieselben zu bilden, als es ihm während ihrer Verbindung mit einander möglich war. In die Atmosphäre aufsteigend verbreiten sich die isolirten Wassermolecüle gleichförmig, ohne merkliche positive Elektricität zu verrathen, da das E in ihnen gebunden ist; im Gegentheile werden sie jetzt, wo sich ihnen das E inniger anschließt, weil sie es weniger in Repulsion versetzen können, im Stande sein, noch mehr E aufzunehmen, falls sich ihnen solches darbietet. Daher werden sich die isolirten Wassermolecüle negativ elektrisch zeigen, was man aber nach der gewöhnlichen Bezeichnungsweise positiv elektrisch nennt. Sobald diese Molecüle sich irgendwo verdichten, muß auch ein Theil des E der Sphären in dem nunmehr entstehenden Dunste sich als freie Elektricität anhäufen. Da aber die Dunstbläschen durch zwischenliegende Lufttheilchen isolirt sind, so wird sich die Wolke noch so ziemlich in einem natürlichen Zustande befinden, bis der Dunst durch Hinzutritt von anderem oder durch sonst eine Ursache dergestalt verdichtet wird, daß die Wassermolecüle in nahe Berührung mit einander kommen. Dann entsteht zwischen den elektrischen Sphären der Molecüle eine heftige Repulsion, vermöge deren das E aus dem Inneren der Wolke nach der Oberfläche getrieben wird, um von

Digitized by Google

da in der Gestalt des elektrischen Funkens sich durch die Luft gewaltsam Bahn zu brechen. Eine so elektrisirte Wolke kann nun auf eine andere, weit entfernte vertheilend wirken, indem der von ihr ausgehende elektrische Druck sich durch die zwischenliegenden Luftschichten und die in denselben befindlichen Dunsttheilchen fortpflanzt und das E der anderen Wolke von der zugekehrten Seite nach der abgewendeten treibt. Während aber das E der ersten Wolke als elektrischer Funken die Luft durchbricht, um in den leeren Raum, welchen es sich in dem zugekehrten Theile der zweiten Wolke geschaffen hat, einzudringen, muß gleichzeitig aus dem entgegengesetzten Theile dieser Wolke, weil hier das E derselben angehäuft ist, ein Blitz hervorbrechen. Ist jedoch die Entfernung beider Wolken sehr bedeutend, so wird das E der ersten nicht wirklich in die zweite gelangen, vielmehr wird das auf der Oberfläche jener Wolke angehäufte E in einer gewissen Entfernung eine Anhäufung des Elektricums in den zwischenliegenden Luft- und Dunstschichten hervorbringen, von wo aus wieder in einer bestimmten Distanz eine Verdichtung der Elektricität bewirkt wird, und so in abnehmendem Grade fort bis zur anderen Wolke. Bricht nun aus der eigentlichen Gewitterwolke ein Blitz hervor, so springen zugleich zwischen beiden Wolken aus allen jenen Stellen, in denen eine Anhäufung des E stattfindet, elektrische Funken über. Hieraus erklärt sich die Länge des Blitzes, welche häufig eine Meile und darüber beträgt. In dem Vorhergehenden liegt auch großentheils der Grund, warum bei Gewittern die Luftelektricität oft schnell aus dem Positiven in's Negative übergeht. In der Anziehung und Abstoßung der gleich- und ungleichnamig elektrisirten Wolken liegt aber die Ursache der ungewöhnlichen Bewegungen, welche man während der Gewitter am Himmel beobachtet.

Schwebt nun eine solche Gewitterwolke hoch über irdische Gegenstände hin, so wird sie vertheilend auf dieselben wirken, indem sie vermöge des von ihr ausgehenden elektrischen Druckes das E dieser Gegenstände zurücktreibt, um ihr eigenes E in den dadurch geschaffenen freien Raum zu senden. Ob dieses Letztere aber wirklich geschieht, hängt von den Umständen ab: nicht allein von der Entfernung der Wolke, sondern auch von der Beschaffenheit des Gegenstandes, in welchem die Vertheilung des E vor sich geht. Ist der Gegenstand, auf den der elektrische Druck vertheilend wirkt, ein Leiter der Elektricität, so kann natürlich in diesem das vorhandene E viel leichter nach der entgegengesetzten Seite in den Boden getrieben werden, wodurch dann auch, wie man leicht sieht, die Gefahr des Ueberschlagens von E aus der

Digitized by Google

Gewitterwolke in den Gegenstand um so größer wird. Wenn aber die Wolke, welche auf solche Weise das E in dem Gegenstande zurückgetrieben hat, nach einer anderen Seite hin sich entladet, so muß das zurückgedrängte E wieder mit Gewalt in dem Gegenstande hervortreten und eine Erschütterung des letzteren verursachen; es findet dann dasjenige statt, was man einen Rückschlag nennt. Während eine Gewitterwolke über der Erde hinzieht und auf diese vertheilend wirkt, entstehen meist Wirbelwinde, welche leichte Körper, wie Staub und Sand, aufjagen und eine Strecke fortführen. Schwebt die Wolke über dem Meere oder über einem großen See, so kann sie in Folge der elektrischen Vertheilung eine merkliche Erhebung des Wassers bewirken, indem sich eine große Woge oder ein Wasserberg bildet. Hiermit sind jedoch die sogenannten Wasserhosen nicht zu verwechseln. Diese bestehen aus einem Doppelkegel, welcher durch eine seiner Grundflächen mit einer Wolke, durch die andere mit dem Wasser zusammenhängt. Derselbe dreht sich gewöhnlich mit großer Geschwindigkeit um seine Axe und hat zugleich eine fortschreitende Bewegung. Die Ursache ist ein Wirbelwind, welcher durch das Zusammentreffen zweier entgegengesetzter, in den oberen Regionen herrschender Winde erzeugt wird. Wenn derselbe über das Land herzieht, so besteht der untere Theil jenes Doppelkegels aus Sand, Staub und anderen festen Körpern und man nennt das Phänomen dann eine Sandhose oder Erdtrombe. Durch solche Tromben werden Bäume entwurzelt, Häuser abgedeckt oder umgestürzt und schwere Balken oft mehrere hundert Fuß weit fortgeführt.

Der Donner, welcher den Blitz begleitet, rührt von der abwechselnden Ausdehnung und Zusammenziehung der Luft her. Da sich aber der Schall langsamer fortpflanzt als das Licht, so sieht man den Blitz eher als man den Donner hört. Weil ferner der Schall von den verschiedenen Punkten der Bahn, welche der Blitz beschreibt, nicht zugleich unser Ohr erreichen kann, so hört man statt eines momentanen Knalles ein mehr oder weniger andauerndes Rollen des Donners. Möglich ist, daß dasselbe noch durch ein Echo in den Wolken verstärkt wird.

196. Die mechanischen und physikalischen Wirkungen des Blitzes sind in der Regel sehr heftig. Alle erhabenen Gegenstände sind vorzugsweise dem Blitzstrahle ausgesetzt, namentlich wenn sie gute Leiter sind. Schlecht leitende Körper werden vom Blitze durchbohrt und zertrümmert, häufig auch verkohlt und entzündet; Metalle werden stark erhitzt oder unter Umständen geschmolzen und verflüchtigt. Bäume

Digitized by Google

erleiden eine Spaltung und Zersplitterung oder die Rinde wird abgeschält und weit fortgeschleudert; man bemerkt dann vom Gipfel bis zum Boden eine Furche und am Fuße des Baumes oft ein Loch, durch welches sich das Elektricum in den Boden verbreitete. Wenn der Blitz in einen sandigen Boden schlägt, so entstehen die sogenannten Blitzröhren, welche oft 10 Meter lang sind und 5 Centimeter im Durchmesser haben. Die innere Fläche derselben ist ganz verglaset, die äußere dagegen rauh, indem sie von geschmolzenen Sandkörnern gebildet wird.

Um Gebäude gegen die zerstörenden Wirkungen des Blitzes zu schützen, dienen die von Franklin erfundenen Blitzableiter. Diese bestehen aus einer zugespitzten Metallstange, welche in die Luft hineinragt, und aus einem guten Leiter, welcher die Stange mit dem Boden verbindet. Jene Stange ist aus Eisen und etwa 15—30 Fuß lang, der obere Theil der Spitze ist vergoldet oder aus Platin gebildet, um das Rosten zu verhüten. Unten ist die Stange wohl abgerundet und mit einer Platte versehen, um das Wasser vom Holze, worin sie befestigt ist, abzuleiten. Oberhalb dieser Platte schlingt sich um den Stab ein eisernes Band, an welches die Leitstange auf's Genaueste befestigt ist. Die letztere wird über das Dach und an dem Gebäude herunter in einen guten Brunnen oder in ein tiefes Bohrloch geführt, welches fortwährend Wasser enthält. Sollte sich kein Wasser in der Nähe finden, so muß man die Stange durch einen langen Kanal, der mit Kohlen ausgefüllt ist, an einen feuchten Ort führen, wobei man sie der größeren Sicherheit wegen noch in mehrere Seitenkanäle verzweigen kann. Die Leitstange ist ein quadratischer Eisenstab, dessen Seite 15—20 Millimeter beträgt. Doch wendet man statt dessen häufig ein von Kupferdraht gewundenes Seil an. Wenn der Blitzableiter seinem Zwecke entsprechen soll, so ist es nothwendig, daß die Leitung nirgends unterbrochen ist. Befinden sich in der Nähe des Blitzableiters bedeutende Metallmassen, so müssen sie mit ihm jedenfalls in eine gute leitende Verbindung gebracht werden.

Der Erfahrung zufolge schützt ein gut angelegter Blitzableiter dieser Art alle Gegenstände ringsum, deren Entfernung von ihm nicht mehr als seine doppelte Höhe über denselben beträgt.

197. Man weiß, daß die Gewitter häufig von Hagel begleitet sind. Derselbe erfolgt zwar in der Regel bei Tage, doch mitunter auch des Nachts. Bei diesem Phänomen kommt es hauptsächlich darauf an, die große Kälte zu erklären, durch welche selbst bei der größten Sommerhitze so bedeutende Eismassen entstehen. Nach Volta's

Digitized by Google

Ansicht wird an der oberen Grenze einer Wolke, welche bis zu sehr trocknen Luftschichten aufgestiegen ist, durch die Einwirkung der Sonnenstrahlen eine sehr lebhafte Verdunstung hervorgerufen. Hierdurch soll nun so viel Wärme gebunden werden, daß das Wasser in den tieferen Wolkenschichten gefriert. Man sieht aber leicht, daß auf diese Weise keine so große Kälte erzeugt werden kann, wenn den oberen Wolkenschichten durch die Sonnenstrahlen Wärme zugeführt wird. Außerdem nahm Volta noch an, daß während der Hagelbildung zwei starke mit entgegengesetzter Elektricität geladene Wolken übereinander schweben. Die zuerst entstandenen noch sehr kleinen Hagelkörner fallen nun aus der oberen auf die untere Wolke, dringen in diese bis zu einer bestimmten Tiefe ein und umgeben sich mit einer neuen Eisschicht. Indem sie sich aber mit der Elektricität der unteren Wolke laden, werden sie von der letzteren abgestoßen, dagegen von der oberen angezogen. Deshalb müssen sie zu dieser wieder aufsteigen, um bald darauf wieder herabzufallen. Auf diese Weise fahren sie eine Zeit lang zwischen beiden Wolken hin und her, bis sie ein Gewicht erlangen, vermöge dessen sie ganz herabfallen müssen. Jedoch hat man diesen Tanz noch niemals in Hagelwolken beobachtet, wozu noch kommt, daß der elektrische Tanz von leichten Korkkügelchen zwischen einer Wasserfläche und einer Metallscheibe nicht stattfindet. Ueberdies ist schwer einzusehen, warum die beiden Wolken ihre entgegengesetzten elektrischen Zustände nicht durch einen plötzlichen Entladungsschlag ausgleichen.

Nach Buch entsteht über Gegenden, welche stark von der Sonne erhitzt werden, ein aufsteigender Luftstrom, welcher die feuchte Luft zu einer solchen Höhe emporhebt, daß sehr viel Wasser daraus ausgeschieden wird. Die Wassertropfen verdunsten beim Fallen rasch, so daß sie gefrieren und dann durch neuen Dunstniederschlag aus der Umgebung, welcher ebenfalls gefriert, fortwährend vergrößert werden. Aber auch hier sieht man nicht wohl ein, wie durch die Verdunstung bei einem aufsteigenden warmen Luftstrome eine so bedeutende Kälte entstehen kann. Wahrscheinlicher möchte folgende im Wesentlichen schon von Franklin und Cotte aufgestellte, später von Muncke weiter begründete Ansicht sein.

Zuvörderst wird darauf aufmerksam gemacht, daß dem Hagelwetter in der Regel Windstille und eine ungewöhnliche schwüle Hitze mit meistens hellem Himmel vorausgeht. In diesem Falle ist die Luft mit Wasserdämpfen völlig gesättigt, mag sie dieselben nun an dem Orte selbst, wo die besagte Witterung herrscht, aufgenommen haben

Digitized by Google

oder mögen ihr dieſelben aus entfernteren, wärmeren und feuchteren Gegenden allmälig zugeführt worden ſein. Ohne Zweifel müſſen die ſtark erwärmten und mit Waſſergas geſättigten Luftſchichten allmälig zu beträchtlichen Höhen aufſteigen, wofür ſich auch verſchiedene Thatſachen anführen laſſen. So fühlten ſich auf La Perouſe's Reiſe die Matroſen im Maſtkorbe oft von glühend heißen Dünſten umgeben und eben ſo bemerkte auch Garnerin auf ſeiner Luftſchifffahrt in den oberen Regionen ſehr warme Luftſchichten. Eben damit ſtimmen Brandes's Beobachtungen über die Strahlenbrechung überein. Wenn nun die ſchwüle Hitze und die Windſtille längere Zeit andauert, ſo iſt es wahrſcheinlich, daß ſich jene feuchte Maſſen weit über die Schneegrenze, alſo in Gegenden erheben, deren Temperatur tief unter dem Gefrierpunkte liegt. Die emporgehobenen Luftmaſſen ſind dann rings von anderen, weit kälteren umgeben, in denen ſie ſich über weit ausgedehnten Strecken eine Zeit lang ruhig oder langſam bewegt erhalten können. Allmälig geben ſie aber an die kälteren, namentlich an die oberen Luftſchichten Wärme ab, es entſtehen die feinſten Dünſte, welche den Himmel in der Form von zarten und flockigen Wolken überziehen. Der Zuſtand dieſer Dunſtmaſſen kann übrigens je nach den Umſtänden auf verſchiedene Weiſe aufgehoben werden; je ſchneller dies aber geſchieht, deſto bedeutender muß die Wirkung ſein. Geſetzt, die feuchten Luftmaſſen ſeien zu einer ſehr beträchtlichen Höhe emporgeſtiegen. Sobald nun an der oberen Grenze eine Verdichtung des Dunſtes ſtattfindet, entſteht in der Maſſe eine Raumverminderung, welche ein Herabfallen der oberen ſehr kalten Luftſchichten zur Folge hat. Es bilden ſich jetzt die erſten Eiskryſtalle, welche die ſchon tief erkalteten Waſſertheilchen der Umgebung anziehen und dadurch ihr Volumen vergrößern. Aber nicht allein die oberen, ſondern auch die unteren Luftſchichten müſſen vermöge der leeren Räume, welche durch die Verdichtung des Dunſtes entſtehen, zu einer Bewegung veranlaßt werden. Während die erſteren herabſinken, müſſen die letzteren aufſteigen, was ein Fallen des Barometers zur Folge hat. Zugleich ſtrömt aber in den unteren Schichten Luft von außen herbei, um die aufſteigende zu erſetzen; daher die nach allen Richtungen wehenden Winde, welche dem eigentlichen Ausbruche des Hagelwetters vorausgehen. Durch das Aufſteigen der unteren Luftſchichten werden aber die zuerſt gebildeten Hagelkörner wieder etwas in die Höhe gehoben, ſo daß dieſelben länger in ihrer kalten Umgebung verweilen müſſen, als ſonſt geſchehen würde. Unter dieſen Umſtänden nimmt indeſſen das Gewicht der Hagelkörner bald zu, ſie fallen herab, während die

Digitized by Google

Wolken, aus denen sie hervorgehen, beim Herabsinken die oberen viel kälteren Luftschichten nach sich ziehen. Das eigentliche Material der Hagelbildung besteht also in jenem tief unter dem Gefrierpunkt erkalteten Wasserdunst, welcher herabsinkt und die sehr kalten und trocknen oberen Luftschichten nach sich zieht, so daß die größeren Eismassen erst in der Tiefe entstehen. Man sieht nun leicht, daß unseren früheren Betrachtungen gemäß bei diesem Processe elektrische Erscheinungen nicht wohl ausbleiben können; sie begleiten die Hagelbildung, sind aber nicht Ursache derselben.

198. Zu den elektrischen Erscheinungen der Atmosphäre rechnet man auch das Nordlicht. Dasselbe zeigt sich am nördlichen Himmel als eine dunkle Wolke in der Gestalt eines kreisförmigen vom Horizont begrenzten Abschnittes, welcher mit einem hellen Ringe umgeben ist, aus dem in unbestimmten Zwischenräumen Lichtstreifen von verschiedenen Farben hervorschießen. Diese Streifen oder Strahlen convergiren nach einem Punkte des Himmels, nach welchem das Südende der Inclinationsnadel hinweist. Mitunter erreichen sie selbst das Zenith und gewähren hier den Anblick einer Strahlenkrone. Das Phänomen wird stets in der Richtung des magnetischen Meridians beobachtet und wir haben schon früher bemerkt, daß es die Declinationsnadel gewöhnlich, jedoch nicht immer, zu bedeutenden Schwankungen veranlaßt. Nach einigen Beobachtern ist das Nordlicht im hohen Norden von einem zischenden, knisternden Geräusch begleitet, welches sie auf die Anwesenheit starker Luftelektricität deuten, die wegen des an den Polen stets vorhandenen Eises nicht wohl in die Erde einströmen kann. Aus der Größe des Raumes, innerhalb dessen manche Nordlichter zugleich gesehen werden, läßt sich auf eine sehr bedeutende Höhe derselben schließen, in welcher die Dichtigkeit der Luft bei Weitem geringer als an der Oberfläche der Erde sein muß. Fast alle Beobachter finden eine große Aehnlichkeit des Nordlichts mit dem Ausströmen der Elektricität im luftverdünnten Raume. Wenn man die bisherigen Erfahrungen zusammenfaßt, so kommt man zu dem Schlusse, daß das Nordlicht wahrscheinlich in einer elektrischen Entladung besteht, welche aber nur durch fortgesetzte Beobachtungen näher bestimmt werden kann.

Digitized by Google

Viertes Kapitel.

Elektricität durch Berührung. Galvanismus.

199. Wenn zwei ungleichartige Leiter der Elektricität mit einander in Berührung kommen, so werden sie allemal entgegengesetzt elektrisch. Man kann sich hiervon direct mit Hülfe eines guten Condensators überzeugen. Zweckmäßig bedient man sich dabei des auf Seite 568 beschriebenen Goldblattelektrometers, indem man die aufgeschraubte kupferne oder messingene Condensatorplatte, welche sich in ihrem natürlichen Zustande befindet, mit einem glatten Stück Zink in metallischen Contact bringt und zugleich die obere Platte ableitend mit dem Finger berührt. Zieht man nun nach einigen Augenblicken das Zink von der unteren und den Finger von der oberen Platte zurück, so fahren die Goldblättchen merklich auseinander, sobald man die obere Condensatorplatte entfernt. Diese Elektricität kann ohne Zweifel nur durch die Berührung des Zinks mit dem Kupfer der unteren Condensatorplatte hervorgerufen sein. Bringt man die obere Platte mit dem Zink, die untere mit dem Finger in Berührung, so divergiren die Goldblättchen mit derjenigen Elektricität, welche der vorigen entgegengesetzt ist.

Man kann auch auf die Weise verfahren, daß man eine Zink- und eine eben so große Kupferplatte, von denen jede mit einem isolirenden Handgriffe versehen ist, mittelst des letzteren in Berührung bringt und dann die Elektricität der einen oder anderen auf einen Condensator überträgt. Dieses Verfahren wiederholt man mehrmals wobei man jedoch diejenige Platte, welche nicht an den Condensator gebracht wird, vorher durch Berührung mit dem Finger in den gewöhnlichen Zustand zurückführen muß, ehe man sie mit der anderen von Neuem in Contact setzt. Der Condensator giebt dann unzweideutig den elektrischen Zustand zu erkennen, welchen die Platte durch die Berührung mit der anderen erlangt hat. Die Zinkplatte erscheint jedesmal positiv, die Kupferplatte aber negativ, oder nach unserer Bezeichnungsweise umgekehrt, die erste negativ, die zweite positiv elektrisch. Bringt man das Kupfer anstatt mit Zink mit irgend einem anderen Metalle in Berührung, so erhält man stets ein ähnliches Resultat, indem das eine Metall positiv, das andere negativ elektrisch wird. Dagegen bringen zwei Stücke desselben Metalls nicht die geringste Wirkung hervor.

Digitized by Google

Um zu zeigen, daß die in Rede stehende Elektricität nicht durch Druck oder eine Reibung der Metalle hervorgebracht werde, kann man nach Volta eine Zink- und eine gleich große Kupferplatte an einander löthen und mit dieser Doppelplatte den Versuch in der Weise anstellen, daß man die Zinkplatte in die Hand nimmt und mit dem Kupfer die untere Condensatorplatte berührt, während man die obere durch einen Finger in leitende Verbindung mit dem Boden setzt. Man findet dann dasselbe Resultat wie oben. Selbst nach einer beliebig langen Zeit zeigen sich die an einander gelötheten Platten noch elektrisch.

Zur Entdeckung der Elektricitätsentwickelung durch den Contact verschiedenartiger Metalle führte eine Beobachtung von Aloysius Galvani im Jahre 1789. Er bemerkte nämlich, daß in dem Schenkel eines vor Kurzem getödteten Frosches Zuckungen entstanden, wenn zwei Metallblättchen, von denen das eine den Schenkelnerv, das andere die Muskeln berührte, mit einander in Contact gebracht wurden. Um die Schenkel zu diesem Behufe zu präpariren, schneidet man den Frosch am Unterleibe quer durch, zieht von den Schenkeln die Haut ab und legt die zu ihnen führenden Nervenstränge bloß, indem man mit einer Scheere die beiden untersten Rückenwirbel wegnimmt. Galvani wurde durch diesen Versuch zur Annahme einer besonderen Nervenflüssigkeit geführt, welche in Folge der metallischen Verbindung von den Nerven zu den Muskeln übergehe und in diesen die Zuckung hervorbringe. Volta zeigte aber, daß die Zuckungen nur dann eintreten, wenn die Metalle, welche die Nerven mit den Muskeln verbinden, ungleichartig sind und daß überhaupt der Contact dieser Metalle die Ursache der betreffenden Erscheinung sei.

200. Wenn die obigen Versuche mit der nöthigen Sorgfalt angestellt werden, so geben sie immer unzweideutige Resultate, es kann daher nicht im Mindesten bezweifelt werden, daß der bloße Contact heterogener Metalle eine Elektricitätsentwickelung veranlasse. Der wahre Grund dieser Erscheinung kann nicht räthselhaft sein.

Wir wissen, daß das Elektricum vermöge seiner Anziehung zur Materie die Elemente und Molecüle der letzteren in Form von Sphären einhüllen muß, daß es aber durch die Repulsion, welche im Innern der Körper zwischen seinen eigenen Elementen entsteht, zum Theil nach der Oberfläche getrieben wird, um sich von da aus allmälig zu zerstreuen. Dies geschieht auch wirklich so lange, bis der Körper durch die allmälige Abnahme der Repulsion mit seiner nächsten Umgebung in's elektrische Gleichgewicht getreten ist. Diejenige Quantität des E, welche auf der Oberfläche des Körpers zurückbleibt, ist abhängig

Digitized by Google

von seiner chemischen Beschaffenheit, seiner Configuration, sowie auch von der Umgebung, mit welcher er sich in's elektrische Gleichgewicht setzen mußte. Man sieht leicht ein, daß sie bei ungleichartigen Körpern verschieden sein muß.

Kommen nun überhaupt zwei ungleichartige Körper mit einander in unmittelbare Berührung, so kann das elektrische Gleichgewicht zwischen ihnen nicht mehr bestehen, sondern es wird ein Uebergang des E aus dem einen in den anderen stattfinden, und zwar wird das E sich zu demjenigen Körper hinwenden, in und auf welchem ihm die freieste Bewegung gestattet ist. So ist zu erwarten, daß das Elektricum bei der Berührung von Zink und Kupfer aus dem ersten in das zweite übergeht, weil das Kupfer ein bei Weitem besserer Leiter als Zink ist. Deshalb kann auch viel leichter vom Zink aus eine Vertheilung des E nach dem Kupfer hin geschehen als umgekehrt.

Berührt man also die kupferne Platte eines Condensators, welche man auf das erwähnte Goldblattelektrometer geschraubt hat, mit einem Stück Zink, das man in der Hand hält, während die andere Condensatorplatte ableitend mit dem Finger berührt wird, so giebt das Zink sogleich einen Theil seines E an das Kupfer ab, welcher sich auf dem letzteren zum Theil frei verbreitet und nach Hinwegnahme der oberen Platte einen Ausschlag der Goldblättchen bewirkt. Die Spannung dieser Elektricität ist allerdings gering, wird aber dadurch, daß man den negativ elektrischen Zustand des Zinkes mit der Hand ausgleicht, merklicher. Weil nämlich das Zink einen Theil seines E an das Kupfer abgegeben hat, ist es ebenso stark negativ elektrisch als das Kupfer durch das, was es vom Zink empfangen, positiv elektrisch ist. Das Zink aber, indem es von der mit ihm in Berührung stehenden Hand +E empfängt und dadurch wieder in seinen früheren Zustand versetzt wird, wirkt wieder vertheilend auf das E der Kupferplatte, wodurch dasselbe an Spannung gewinnen und einen stärkeren Ausschlag der Goldblättchen hervorbringen muß.

Legt man auf eine ganz ebene Kupferplatte eine gleich große und gleichfalls eben geschliffene Zinkplatte, ohne daß man jedoch die letztere in leitender Verbindung mit der Hand läßt, so wird das E des Zinkes zum Theil gerade so wie im vorigen Falle zum Kupfer übergehen, aber nur der kleinste Theil des E, welches das Kupfer vom Zink empfangen hat, wird sich frei nach außen zeigen. Denn die Elektricität kann nicht von einem Körper auf den anderen übergehen, ohne daß das im letzteren schon vorhandene E eine gewisse Rückwirkung ausübt. Deshalb wird die vom Zink zum Kupfer übergegangene

Digitized by Google

Elektricität noch nach dem ersteren hin gerichtet sein, zumal da dieses nun negativ elektrisch ist. Sobald man aber die Zinkplatte abhebt, kann sich die dem Kupfer mitgetheilte Elektricität freier auf der Oberfläche desselben verbreiten und deshalb eine merkliche Spannung verrathen.

Bringt man nun eine isolirte Zinkplatte mit einer gleich großen und ebenfalls isolirten Kupferplatte in Berührung, so wird die letztere eben so stark positiv elektrisch als die erstere durch Abgabe eines Theils ihrer Elektricität negativ elektrisch geworden ist. Weil aber das im Kupfer schon befindliche E auf die vom Zink kommende Elektricität zurückwirkt, so kann das Zink nicht so viel E an das Kupfer abgeben, als geschehen würde, wenn man das letztere nicht isolirt hätte. Giebt man daher dem E des Kupfers eine Ableitung, so muß der negativ elektrische Zustand des Zinks stärker hervortreten und zwar um so viel mehr als das Kupfer an +E verloren hat, d. h. der negativ elektrische Zustand der Zinkplatte wird beinahe auf das Doppelte steigen. Dagegen sieht man leicht, daß die Differenz der elektrischen Zustände beider Metallplatten stets dieselbe bleiben muß, mögen sie nun isolirt sein oder nicht. Auch ist es zufolge früherer Betrachtungen klar, daß dasjenige Metall, welches sein E an das andere abgiebt, dies um so leichter thun wird, je mehr Oberfläche das letztere darbietet.

201. Gewöhnlich nimmt man an, daß an der Berührungsstelle heterogener Körper eine besondere Kraft vertheilend auf die in diesen Körpern vorhandene Elektricität wirke, dergestalt, daß die eine positiv, die andere negativ elektrisch werde. Man hat ihr den Namen „elektromotorische Kraft" gegeben. Hoffentlich wird man aus dem bisher Gesagten entnommen haben, daß die Annahme einer solchen Kraft durchaus überflüssig ist. Aus dem Obigen folgt ohne Weiteres, daß zwei sich berührende Körper eine um so größere Spannung erlangen müssen, je mehr sie hinsichtlich ihrer chemischen Natur und überhaupt hinsichtlich ihrer gesammten Constitution von einander abweichen; desto mehr Veranlassung ist dann für das E vorhanden, aus dem einen dieser Körper in den anderen überzugehen. Dies gilt allgemein für alle Körper, obgleich die Metalle wegen ihrer größeren Leitungsfähigkeit vorzugsweise in Betracht kommen, da das E sich in ihnen am freiesten bewegen und am leichtesten eine Vertheilung desselben bewirkt werden kann. Bei zwei Metallen, zwischen denen gar kein Gegensatz stattfindet, muß deshalb die elektrische Spannung = 0 sein. Doch können selbst zwei Stücke eines und desselben Metalls durch Berührung elektrisch werden, wenn dieselben in ihrer Härte, in der

Digitized by Google

Beschaffenheit ihrer Oberfläche, in dem Grade ihrer Temperatur, in ihrer Form und Größe oder durch sonstige Umstände sich von einander unterscheiden. In diesem Falle kann ein wahres elektrisches Gleichgewicht während der Berührung nicht wohl zwischen ihnen bestehen.

Damit sich bei Körpern, welche man mit einander in Contact gebracht hat, eine elektrische Spannung herausstelle, ist es nöthig, daß das elektrische Gleichgewicht zwischen ihnen aufgehoben werde, und die Bedingung hierzu liegt in der Ungleichartigkeit derselben. Das, was man elektromotorische Kraft nennt, ist durchaus nichts für sich Bestehendes, sondern fließt unmittelbar aus dem Gegensatze derjenigen Körper, welche mit einander in Berührung gebracht werden. Aus dem Gegensatze folgt aber die Spannung ganz von selbst. Auch wir werden von dem Ausdrucke „elektromotorische Kraft" Gebrauch machen, müssen uns aber dabei erinnern, daß sie ihren Sitz weder in dem einen noch in dem anderen von den Körpern hat, welche sich berühren, sondern in dem Gegensatze, welcher zwischen beiden Körpern stattfindet und der hinsichtlich der Elektricitätsentwickelung freilich erst dann von Bedeutung werden kann, wenn die Körper mit einander in Berührung kommen. Je größer der Gegensatz, desto größer die Störung des elektrischen Gleichgewichtes und um so stärker die elektrische Spannung. In dieser Hinsicht bilden die Metalle nebst der Kohle eine bestimmte Reihenfolge unter einander, dergestalt, daß das vorhergehende Metall den einen und das nachfolgende den entgegengesetzten elektrischen Zustand annimmt. Je weiter nun zwei Metalle in dieser Reihe auseinander liegen, desto größer ist die Intensität der durch ihren gegenseitigen Contact erregten elektrischen Zustände. Von den nachbenannten Körpern wird jeder vorhergehende in Berührung mit allen folgenden negativ elektrisch, indem er sein E zum Theil an dieselben abgiebt: Zink, Blei, Zinn, Eisen, Kupfer, Silber, Gold, Platin, Kohle.

Mit Hülfe des Goldblattelektrometers läßt sich leicht nachweisen, daß die elektrische Differenz je zweier beliebiger Glieder in der Spannungsreihe gleich ist der Summe der elektrischen Differenzen der Zwischenglieder. Man schraube auf das Goldblattelektrometer eine Condensatorplatte aus Kupfer, deren obere Fläche gefirnißt ist, und setze auf diese eine Condensatorplatte von Zink, deren untere Fläche gleichfalls mit Firniß überzogen ist. Bringt man nun die beiden nicht gefirnißten, also metallischen Flächen dieser Platten durch einen Kupferdraht in Verbindung, so wird durch die Berührung des Kupferdrahtes mit der Zinkplatte Elektricität entwickelt, welche durch den Draht nach

Digitized by Google

der Kupferplatte des Elektrometers geht und hier nach Hinwegnahme der Zinkplatte einen Ausschlag der Goldblättchen bewirkt. Verbindet man aber die Zink- und Kupferplatte durch einen Bleidraht mit einander, so erhält dieser zunächst von der Zinkplatte einiges E, welches er der Kupferplatte mittheilt. Außerdem giebt aber auch noch der Bleidraht von seinem eigenen E etwas an die Kupferplatte ab, da auch zwischen ihnen das elektrische Gleichgewicht aufgehoben ist. Der Ausschlag der Goldblättchen ist aber eben so groß als beim vorigen Versuche, so daß also die elektrische Differenz zwischen Zink und Kupfer gleich ist der Summe der elektrischen Differenzen zwischen Zink und Blei und zwischen Blei und Kupfer. Ein ähnliches Resultat erhält man, wenn man statt eines Bleidrahtes einen Silber- oder Platindraht anwendet.

Man sieht hieraus aber auch, daß, wenn man 3, 4 oder noch mehr Metalle aus jener Reihe auf einander legt, die elektrische Spannung der Endplatten eben so groß ist, als ob sich dieselben unmittelbar berührten. Man bringe z. B. Zink, Blei und Platin so mit einander in Berührung, daß das Blei auf das Platin und das Zink auf das Blei zu liegen kommt. Nun giebt das Blei einen Theil seines E an das Platin ab, so daß dieses positiv, jenes aber negativ elektrisch wird. Diese Spannung ist freilich nicht so stark als die zwischen Zink und Platin, aber zu demjenigen Elektricum, welches das Platin vom Blei erhalten hat, kommt noch ein Theil dessen, was das Blei vom Zink erhält. Nämlich Zink im Contact mit Blei wird negativ elektrisch, indem es einen Theil seines E an das Blei entläßt, welcher nun von letzterem wieder theilweise zum Platin übergeht, und so die Spannung des E auf demselben vermehrt. Eben so verhält es sich mit dem negativ elektrischen Zustande des Zinks, welcher beim Contact mit Blei schwächer hervortritt als beim Contact mit Platin, aber dadurch wieder erhöht wird, daß das Blei einen Theil des von ihm empfangenen E an das Platin abgiebt. Daher kommt es, daß die elektrische Spannung der Endplatten eben so groß wird, als ob sie sich unmittelbar berührten.

Auch zwischen Metallen und Flüssigkeiten muß eine Elektricitätsentwickelung stattfinden, doch nehmen die Flüssigkeiten keine bestimmte Stelle in der Spannungsreihe der Metalle ein. So wird Zink in Berührung mit Wasser positiv elektrisch, was auch vom Platin, aber in viel geringerem Grade gilt. Zink, Eisen, Kupfer werden von verdünnter Schwefelsäure positiv, Gold und Platin aber negativ elektrisirt.

Digitized by Google

Durch concentrirte Salpetersäure erhalten Platin, Gold, Kupfer, Eisen eine negative Ladung.

Um die elektrische Erregung zwischen Metallen und Flüssigkeiten genauer zu untersuchen, bediente sich Buff eines sehr empfindlichen Fechner'schen Säulenelektroskopes, welches wir bald näher werden kennen lernen. Auf dasselbe wurde von dem zu prüfenden Metalle eine Scheibe befestigt, deren obere Fläche gefirnißt war. Alsdann wurde auf die letztere eine möglichst dünne, geschliffene Spiegelglasplatte, deren eine Fläche gleichfalls gefirnißt war, so aufgelegt, daß die eben erwähnte Fläche nach unten zu liegen kam. Auf der Oberfläche des Glases wurde nun die zu prüfende Flüssigkeit ausgebreitet, welches in der Regel dadurch geschah, daß man ein mit der Flüssigkeit getränktes Löschpapier oben auflegte. Die Flüssigkeit wurde dann durch einen passenden Metallstreifen mit der unteren Metallplatte verbunden und darauf die etwas hervorragende Glasscheibe entfernt. Das Elektroskop gab nun die Ladung der unteren Platte und damit auch die elektrische Spannung zwischen der Flüssigkeit und dem Metalle zu erkennen.

202. Wir wollen nun zur Betrachtung der Volta'schen Säule übergehen, welche aus zwei verschiedenartigen Metallen und einem dritten Elemente, dem in der Spannungsreihe der Metalle keine bestimmte Stelle zukommt, zusammengesetzt ist.

Es werde eine Kupferplatte mit dem Boden in leitende Verbindung gebracht und auf ihre obere Fläche eine gleich große Zinkplatte gelegt. Alsdann wird das Zink negativ, das Kupfer positiv elektrisch. Nun strömt aber das freie +E des Kupfers in den Boden über, während das Zink negativ elektrisch in einem Grade bleibt, welcher dem Gegensatze zwischen Zink und Kupfer entspricht. Wird der Zinkplatte aus irgend einer Quelle E mitgetheilt, so geht dasselbe sogleich wieder zum Kupfer und von da in den Boden über.

Legt man auf das Zink eine Scheibe von Tuch oder Pappe, welche mit reinem Wasser oder mit einer verdünnten Säure oder Kochsalzlösung durchdrungen ist, so giebt dieselbe einen Theil ihres E an das negativ elektrische Zink ab, welches ihn alsbald wieder zum Kupfer schickt, um von diesem in den Boden zu fließen. Wir betrachten hier die feuchte Scheibe nur als Leiter, welcher deshalb, weil er mit einem anderen negativ elektrischen Leiter in Berührung ist, etwas von seinem E abtreten muß. Die feuchte Scheibe ist nun ebenfalls negativ elektrisch geworden; legt man daher auf sie eine Kupferplatte, so wird auch diese einiges E an jene abgeben müssen, welche dasselbe

Digitized by Google

wieder durch das Zink und Kupfer zum Boden sendet. Die unterste Kupferplatte, welche mit dem Boden leitend verbunden ist, befindet sich also im natürlich elektrischen Zustande, während die Zinkplatte, die feuchte Scheibe und die obere Kupferplatte in gleichem Grade negativ elektrisch sind. Wird auch noch auf die obere Kupferplatte eine Zinkplatte gelegt, so muß diese an jene so viel von ihrem eigenen E abgeben, daß sie mit demselben in gleichem Grade negativ elektrisch wird. Hierzu kommt aber noch derjenige Antheil von E, welchen das Zink wegen seines Gegensatzes zum Kupfer an das letztere abtreten muß, selbst wenn dieses in natürlich elektrischen Zustand sich befände. Der negativ elektrische Zustand der Zinkplatte, verglichen mit dem des Kupfers, muß deshalb doppelt so stark hervortreten.

Fährt man fort, feuchte Scheiben, Kupfer- und Zinkplatten in der bisherigen Ordnung auf einander zu schichten, so wird der negativ elektrische Zustand der Zinkplatten in der Reihe der natürlichen Zahlen zunehmen, d. h. auf der 3, 4, 5, ... 100ten Zinkplatte wird die freie —E die Intensität 3, 4, 5, ... 100 haben.

Hierzu gesellt sich noch die elektrische Spannung, welche aus der Berührung der Flüssigkeit mit den Metallen hervorgeht. Hat diese Spannung dieselbe Richtung mit der aus dem Contact der Metalle hervorgehenden, so wird die Wirksamkeit der Säule erhöht, gegentheils aber gehemmt und unter Umständen ganz aufgehoben.

Anstatt das Kupfer mit dem Boden leitend zu verbinden, kann dies auch umgekehrt mit dem Zink geschehen, wodurch aber die Anordnung der Elemente die entgegengesetzte von der vorigen wird.

Es sei also das Zink mit dem Boden in leitender Verbindung. Legt man auf dasselbe eine Kupferplatte und auf diese eine feuchte Scheibe, so giebt das Zink E an das Kupfer und das letztere wieder einen Theil des gewonnenen an die feuchte Scheibe ab; indessen ist dem Zink sein Verlust durch Zuleitung aus dem Boden ersetzt worden, welches daher im gewöhnlichen Zustande bleibt. Wird auch auf die feuchte Scheibe eine Zinkplatte gelegt, so nimmt letztere dasjenige E auf, welches die erstere von der Kupferplatte empfangen hatte, schickt jedoch dasselbe sogleich fort, falls man mit ihr eine Kupferplatte in Contact bringt. Außerdem erhält aber diese Kupferplatte auch noch dasjenige Quantum von E, welches aus dem bloßen Contact mit Zink hervorgeht und dem Gegensatze zwischen beiden entspricht. Die Intensität der Elektricität auf der zweiten Kupferplatte muß mithin doppelt so groß sein als auf der ersten, wo die elektrische Spannung

Digitized by Google

nur eine solche Größe hat, wie sie aus der Berührung des Zinks mit Kupfer resultirt.

Baut man eine Säule in der Weise fort, daß die Elemente stets in der Ordnung: Zink, Kupfer, feuchte Scheibe auf einander folgen, so wird die Intensität des +E von der einen Kupferplatte zur anderen eben so zunehmen, wie im vorigen Falle der negativ elektrische Zustand der Zinkplatten.

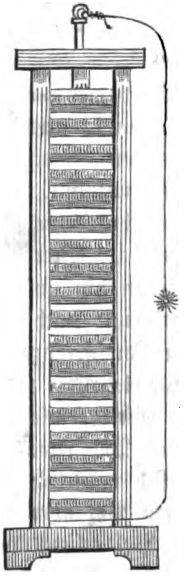
Entzieht man der obersten Kupferplatte das angehäufte Elektricum, so wird dasselbe sogleich wieder ersetzt, so lange die unterste Zinkplatte mit dem Boden in leitender Verbindung steht.

Das Zinkende und Kupferende einer Volta'schen Säule haben nun stets entgegengesetzte elektrische Zustände. Wir nennen unserer Bezeichnungsweise gemäß das Zinkende den negativen und das Kupferende den positiven Pol.

Wenn eine Säule hinlänglich isolirt ist, so wächst vom negativen zum positiven Pole hin das +E auf den Kupferplatten in arithmetischer Progression, während vom positiven zum negativen der negativ elektrische Zustand der Zinkplatten auf dieselbe Weise zunimmt. In der Mitte der Säule befindet sich ein Plattenpaar, welches keine freie Elektricität zeigt, ein sogenannter Indifferenzpunkt. Von hier aus nehmen die elektrischen Zustände nach beiden Seiten hin an Intensität zu, nämlich nach dem Zinkpol hin der negativ und nach dem Kupferpol hin der positiv elektrische Zustand. Der Indifferenzpunkt theilt also die Säule gleichsam in zwei entgegengesetzte elektrische Hälften: in eine positive und negative. Stört man das Gleichgewicht in der isolirten Säule dadurch, daß man dem positiven Pol etwas E durch Berührung mit dem Finger entzieht, so muß sich natürlich hier die elektrische Spannung vermindern, an dem anderen Pol aber vermehren, weil durch den Verlust, den der positive Pol erlitten hat, die Kupferplatte des unmittelbar vorhergehenden Paares genöthigt wird, einen Theil ihres E durch die feuchte Scheibe und die Zinkplatte an den Kupferpol abzugeben, wodurch nun wieder diese Kupferplatte zum Theil empfänglich für neues E geworden ist, welches ihr auch von dem Kupfer des nächsten Paares gegeben wird. Dies geht so fort bis zum ersten Plattenpaare, dessen Kupfer einen Theil seines E an das folgende abgetreten hat, ohne daß ihm dieser Verlust auf gleiche Weise ersetzt worden, da ihm keine Kupferplatte mehr vorausgeht. Weil also ein Theil der ganzen Elektricität der negativen Hälfte sich dem positiven Pole der Säule zuwendet, so muß der negativ elektrische Zustand des Zinkpoles noch stärker hervortreten, während eben dadurch

Digitized by Google

der Indifferenzpunkt dem positiven Pole genähert wird, welchem das E entzogen worden ist. Mit der allmäligen Wiederherstellung des Gleichgewichtes nimmt der Nullpunkt wieder die Mitte der Säule ein. Umgekehrt verhält sich's, wenn man dem Zinkpol durch Berührung mit dem Finger einige Elektricität mittheilt, wodurch der negativ elektrische Zustand desselben vermindert und die Spannung des +E am Kupferpole erhöht wird, da durch jene Mittheilung der Drang des E in der Säule nach diesem Pole hin stärker geworden ist. Zugleich rückt der Indifferenzpunkt dem Zinkpole näher. Doch muß auch hier wegen des Verlustes, der nun an dem stärker geladenen Pole stattfindet, das frühere Gleichgewicht sich wiederherstellen.



Werden die Pole der Volta'schen Säule mit Drähten versehen, so wird der mit dem positiven Pole verbundene jedenfalls positiv elektrisch, während der mit dem negativen Pole in Verbindung stehende dadurch, daß er sein E an diesen Pol abgiebt, negativ elektrisch wird. Bringt man aber beide Drähte mit einander in Berührung, so ist an den Polen keine Spannung nach außen hin mehr bemerkbar, sondern das Elektricum circulirt nun als Strom vom positiven Pol der Säule durch den Draht zum negativen, u. s. w. Hält man die beiden Drähte in geringer Entfernung einander gegenüber, so gewahrt man einen continuirlichen Funkenstrom von dem einem Drahte zu dem anderen.

Wenn man die Pole des Volta'schen Apparates durch eine Säule aus abwechselnden Lagen von Metallplatten und feuchten Papierscheiben schließt, so ladet sich die eine Hälfte derselben mit positiver, die andere mit negativer Elektricität. Wegen der unvollkommenen Leitungsfähigkeit des Systemes dauert dieser Zustand einige Zeit hindurch, so daß das System, vom Volta'schen Apparate getrennt, ähnliche Erscheinungen wie dieser zeigt. Dasselbe gewahrt man, nur in viel geringerem Grade, bei einem feuchten Papierstreifen, welcher eine Zeit lang zwischen den Polen eingeschaltet war. Eine Säule der vorerwähnten Art, welche von Ritter entdeckt wurde, nennt man Ladungssäule oder secundäre Säule.

203. Von besonderem Interesse sind noch die trockenen oder Zamboni'schen Säulen, welche aus lauter festen Substanzen ohne

Digitized by Google

feuchten Zwischenleiter bestehen. Gewöhnlich errichtet man sie aus 1 bis 1½ Zoll im Durchmesser haltenden Scheiben von Papier, welche auf der einen Seite mit ächtem Blattsilber belegt sind, und eben so großen und dicken Platten von Zinkblech, wovon man 1000 Paare und noch darüber in der gehörigen Ordnung auf einander schichtet. Die so aufgebaute Säule wird noch, um sie vor dem Einflusse der feuchten Luft zu schützen, mit geschmolzenem Schwefel oder Schellack überzogen. Jäger construirte solche Säulen aus unächtem Gold- und Silberpapier, indem er davon 1000 bis 2000 Paar Scheiben aufschichtete und dieselben der innigeren Berührung wegen etwas zusammenpreßte. Daß die Wirksamkeit einer solchen Säule viel geringer sein muß als die einer Volta'schen, ist leicht einzusehen; der Grund liegt in der unvollkommenen Leitungsfähigkeit des Papiers.

Werden die Pole der Säule isolirt, so zeigen dieselben bald eine merkliche Spannung. Hat die letztere an demjenigen Pole, an welchem das E wirklich angehäuft ist, eine gewisse Grenze erreicht, so findet ein fortwährender Verlust an die Luft statt. Während aber der positive Pol E durch die Luft verliert, gewinnt der negative solches von derselben. Die Spannung an den Polen bleibt constant, wenn dasjenige E, welches der positive Pol in jedem Moment verliert, von der Säule sogleich wieder zugeführt werden kann. Sobald indessen die Luft feuchter wird, beträgt der elektrische Verlust so viel, daß er erst nach einer gewissen Zeit von dem anderen Pole her durch die Säule ersetzt werden kann, weil nun die Säule sich wieder vollständig laden muß und einmal in gegebener Zeit nicht mehr Elektricum liefern kann, als der Leitungsfähigkeit des Papiers entspricht. In feuchter Luft muß daher die Spannung an den Polen geringer sein als in trockener Luft.

Statt Papier können auch dünne Scheiben von Harz, Firniß, Salpeter u. dgl. zur Construction trockener Säulen benutzt werden. Jäger baute eine Säule aus dünnen Glasscheiben, die auf der einen Seite mit Kupferfolie, auf der anderen mit Zinkfolie belegt waren. Natürlich müssen die Metallfolien in der gehörigen Ordnung auf einander gelegt werden, so daß immer Kupfer auf Zink zu liegen kommt. Wir wollen annehmen, es werde wie bei der Volta'schen Säule zuerst ein Zink- und Kupferblättchen mit einander in Berührung gebracht, alsdann statt des feuchten Leiters auf das Kupfer eine dünne Glasscheibe und auf diese wieder ein Plattenpaar von Zink und Kupfer gelegt, dergestalt, daß das Zink die Glasscheibe berührt.

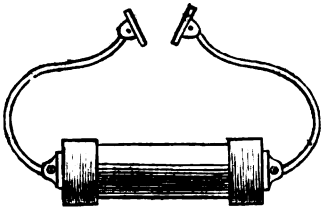
Beim ersten Plattenpaare geht dann das E hier wie dort aus

Digitized by Google

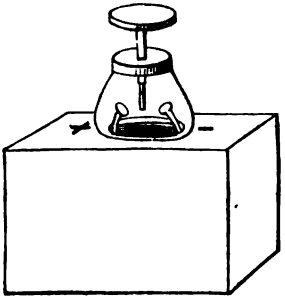
dem Zink zum Kupfer über; während aber bei der Volta'schen Säule das im Kupfer angehäufte E zum Theil durch die feuchte Scheibe nach der folgenden Zinkplatte strömt, wirkt hier das E des ersten Kupferplättchens vertheilend durch die dünne Glasscheibe hindurch auf das Zinkplättchen des folgenden Paares. Nun hat dieses Zink schon so viel E an das mit ihm im Contact befindliche Kupfer abgetreten, als der Gegensatz zwischen beiden fordert; hierzu kommt noch jene vertheilende Wirkung, welche das Kupfer des ersten Paares durch die Glasscheibe hindurch auf das Zink des zweiten ausübt. In Folge dieser Vertheilung muß jedenfalls die Spannung des E auf dem zweiten Kupferplättchen bedeutender sein als auf dem ersten. Legt man nun auf das zweite Kupferplättchen wieder eine Glasscheibe und auf diese in der erwähnten Ordnung ein Plattenpaar, so erhält das dritte Kupferplättchen erstlich vom Zink so viel E, als es dem Gegensatze beider gemäß ist, außerdem erfährt es aber noch den vertheilenden Einfluß, welcher von dem zweiten Kupferplättchen durch die Glasscheibe auf das mit ihr in Verbindung stehende Zink ausgeübt wird. Die elektrische Spannung muß aber auf dem dritten Kupferplättchen in demselben Verhältnisse stärker als auf dem zweiten sein, in welchem sie auf dem letzteren bedeutender als auf dem ersten ist. Während nun auf diese Weise die Spannungen des +E auf den Kupferplättchen mit Vermehrung der Paare wachsen, muß in entgegengesetzter Richtung der negativ elektrische Zustand der Zinkplättchen in derselben Progression entschiedener hervortreten. —

Die trockene Säule läßt sich zur Construction eines vortrefflichen Elektroskopes benutzen. Bohnenberger stellte zwei starke, trockene Säulen vertical auf, in der Art, daß der positive Pol der einen dem negativen Pole der anderen gegenüber stand, und befestigte in der Mitte zwischen diesen Polen ein Goldblättchen. Wird nun dem letzteren die geringste positive oder negative Ladung beigebracht, so bewegt es sich nach dem einen oder anderen Pole und giebt dadurch zugleich die Art der mitgetheilten Elektricität zu erkennen. Man sieht, daß ein solches Elektroskop große Bequemlichkeit gewährt. Becquerel gebrauchte statt zweier verticaler Säulen eine einzige horizontal liegende, welche mit verticalen Polplatten versehen war, zwischen denen das Goldblättchen herabreichte. Die wesentlichste Verbesserung erhielt aber der Apparat durch Fechner. Eine trockene Säule, welche aus etwa 800—1000 Plattenpaaren besteht, ist mit gefirnißten Seidenfäden zusammengeschnürt und in eine Glasröhre eingeschlossen, deren Enden mit metallenen Kappen versehen sind. An die letzteren, welche mit

Digitized by Google



den Polen in leitender Verbindung stehen, sind Metalldrähte befestigt, welche an ihren Enden eine Metallplatte tragen. Diese Säule wird nun in horizontaler Lage in einen Kasten gebracht, so daß die eben erwähnten Polplatten etwas aus ihm hervorragen. Zwischen ihnen hängt das Goldblättchen an einem isolirten Metallstäbchen. Der dem Blättchen mitgetheilte elektrische Zustand



ergiebt sich ohne Weiteres aus der Richtung, welche es einschlägt. Um sich in dieser Hinsicht sogleich orientiren zu können, ist auf der Oberfläche des Kastens auf der Seite der positiven Polplatte das Zeichen +, auf der Seite der negativen das Zeichen — angebracht. Mit Hülfe dieses Apparates lassen sich die früher beschriebenen Volta'schen Fundamentalversuche über die Elektricitätsentwickelung durch Contact verschiedenartiger Metalle am einfachsten und sichersten anstellen. Schraubt man z. B. auf das Elektroskop eine eben geschliffene Kupferplatte und setzt man auf diese eine gleich große, ebene Zinkplatte, so erfolgt sogleich ein Ausschlag des Goldblättchens nach dem negativen Pole hin, wenn man die Zinkplatte parallel mit der Kupferplatte abhebt.

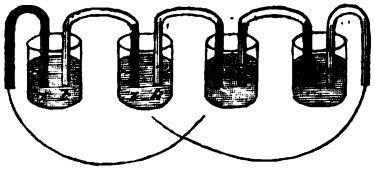
204. Die beschriebene Volta'sche Säule ist mit manchen Unbequemlichkeiten verbunden, namentlich ist das Reinigen ihrer einzelnen Theile nach dem Gebrauche etwas lästig. Es wurden deshalb schon früh andere Formen der Säulen eingeführt.

Der Trogapparat besteht aus einem Kasten von Holz, dessen innere Wände mit einer Harzschicht überzogen sind, oder auch aus einem Kasten von Steingut oder Porzellan, in welchen die einzelnen Plattenpaare, von denen jedes aus einer Zink- und Kupferplatte durch Löthung zusammengesetzt ist, so eingesetzt werden, daß immer die Kupferseite des einen Paares der Zinkseite des folgenden zugekehrt ist. In die Zwischenräume oder Zellen, welche je zwei Plattenpaare bilden, wird der flüssige Leiter gegossen.

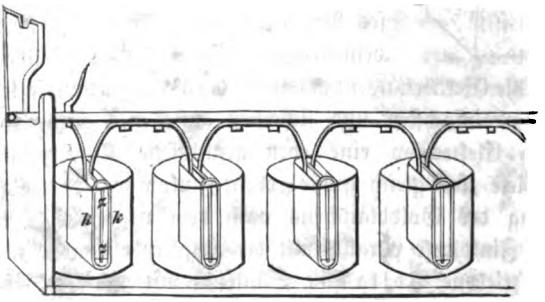
Eine bloße Abänderung des Trogapparates ist der sogenannte Becherapparat, welcher schon von Volta angewendet wurde. Die Flüssigkeit wird hier in eine Anzahl von Gläsern gegossen, von denen

Digitized by Google

jedes eine Zink- und Kupferplatte enthält, die ſich aber nicht berühren; dagegen iſt jede Zinkplatte durch einen Kupferſtreifen mit der Kupferplatte des folgenden Glaſes verbunden. Nach Berzelius kann man die Zinkplatte durch eine bloße Zinkkugel erſetzen, an welche ein gekrümmter Kupferdraht gelöthet iſt, der am andern Ende, welches in das nächſte Glas reicht, etwas breit geſchlagen iſt und ſo als Kupferplatte dient. Mit Vortheil kann man bei den Becherapparaten anſtatt des Kupfers Eiſen anwenden.



Der zweckmäßigſte Trogapparat iſt die ſogenannte Wollaſton'ſche Batterie. Hier ſind die Kupferplatten kk um die Zinkplatten zz gebogen, ſo daß ſie dieſelben von zwei Seiten einſchließen. Beide Platten ſind durch kleine Holzſtückchen bis auf einen geringen Abſtand von einander getrennt. Jede Zinkplatte ſteht aber mit der Kupferplatte des nachſtehenden Gefäßes durch einen Kupferſtreifen in metalliſcher Verbindung. Die Gefäße werden gewöhnlich mit verdünnter Schwefelſäure gefüllt. Um alle Platten mit einem Male in die Flüſſigkeit eintauchen und wieder herausnehmen zu können, ſind ſie ſämmtlich an einer Holzleiſte befeſtigt.



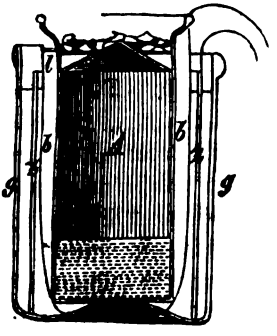
Zu manchen Wirkungen, welche mit dem Volta'ſchen Apparate hervorgebracht werden ſollen, iſt ein einziges, ſehr großes Plattenpaar mit vollkommen metalliſcher Schließung einer Säule von vielen kleinen Plattenpaaren vorzuziehen. Man erhält dann eine ſogenannte einfache Kette. Stellt man in ein Gefäß mit verdünnter Schwefelſäure eine Zink- und Kupferplatte einander gegenüber, ſo erhält jede durch den Contact mit der Flüſſigkeit eine ſchwache poſitive Ladung, das Zink jedoch nach dem Früheren eine ſtärkere als das Kupfer, ſo daß ſich das letztere in Beziehung auf das erſtere als negativ elektriſch betrachten läßt. Werden aber die beiden ungleichartigen Metalle außerhalb der Flüſſigkeit mit einander in Berührung gebracht oder

Digitized by Google

durch einen Draht leitend verbunden, so giebt das Zink sein Elektricum an das Kupfer ab, von dem es dann weiter durch die Flüssigkeit zum Zink zurückkehrt u. s. w. Diese Vorrichtung nennt man eine einfache, geschlossene Volta'sche Kette, der man wieder verschiedene Formen geben kann.

Wenn man eine sehr große Menge von Elektricität entwickeln will, so müssen die Metallplatten eine große Oberfläche haben, wie dies in Hare's Calorimotor der Fall ist, ein Apparat, welcher deshalb so genannt wird, weil er sich durch die Eigenschaft, Metalldrähte glühend zu machen und zu schmelzen, besonders auszeichnet. Man rollt ein langes Stück Zinkblech und ein gleich großes Kupferblech, zwischen welche man ein eben so langes Stück Leder gelegt hat, spiralförmig zusammen und nimmt dann das Leder wieder heraus. Um eine Berührung der beiden Metallplatten zu verhindern, werden oben und unten Holzstäbchen mit Einschnitten befestigt, in welche die metallenen Ränder gerade passen. Diese Vorrichtung bringt man in einen gläsernen Cylinder, welcher mit Schwefelsäure angefüllt ist. Werden nun die Metalle durch einen Schließungsdraht wohl mit einander verbunden, so beginnt der Apparat alsbald seine Wirksamkeit.

Die bisher beschriebenen Apparate zeigen sich zwar anfangs sehr kräftig, aber ihre Wirkung läßt bald nach. Deshalb ist die von Becquerel erfundene sogenannte constante Kette eine wesentliche Verbesserung des Volta'schen Apparates. Man nennt diese Kette constant, weil ihre Wirkung längere Zeit hindurch in derselben Stärke fortdauert. Bei einer derartigen Kette kommen zwei verschiedene Flüssigkeiten in Anwendung. Die Becquerel'sche Kette besteht aus einem hohlen Cylinder A von Kupferblech, der mit etwas Sand beschwert und dessen oberer Verschluß eine conische Form hat. Oberhalb des letzteren befindet sich ein Rand, in dem bei l mehrere Löcher angebracht sind. Der ganze Cylinder ist mit einer Thierblase b b umgeben, welche oben am Rande befestigt ist. Gießt man nun auf den kegelförmigen Deckel eine Auflösung von Kupfervitriol, so läuft dieser durch die Löcher l aus, um den Raum zwischen der Blase und dem Cylinder auszufüllen. Außerdem legt man noch einige Stückchen Kupfervitriol auf, welche sich allmälig in der Flüssigkeit auflösen und die während der Thätigkeit des Apparates



Digitized by Google

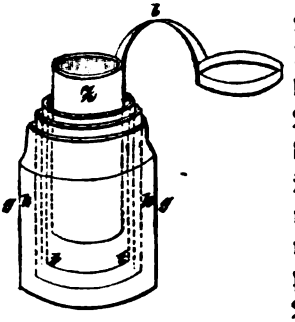
verwendete Lösung ersetzen. Die Blase ist von einem hohlen Zinkcylinder z z umgeben, welcher der Länge nach aufgeschlitzt ist, um ihn nach Willkür enger oder weiter machen zu können. Das Ganze befindet sich in einem Cylinder g g von Glas oder Porzellan, welcher mit verdünnter Schwefelsäure oder einer Lösung von Zinkvitriol oder Kochsalz gefüllt ist. Durch die Blase wird die Berührung der beiden Flüssigkeiten nicht verhindert, wohl aber ihre vollkommene Vermischung. Sowohl an den Zink- als auch an den Kupfercylinder ist ein starker Kupferdraht gelöthet, wodurch die Kette geschlossen werden kann, wenn ihre Thätigkeit beginnen soll. Zu diesem Behufe braucht man nur die beiden Poldrähte mit einander in leitende Verbindung zu bringen.

Eine Abänderung des so eben betrachteten Apparates ist Daniell's constante Kette. Bei dieser befindet sich ein massiver Zinkcylinder, oder auch eine Zinkspirale in einer thierischen Blase, welche mit verdünnter Schwefelsäure angefüllt ist. Statt dessen kann man aber auch das Zink in einen mit der erwähnten Flüssigkeit gefüllten Cylinder von porösem Thon bringen. Alsdann senkt man diese Vorrichtung in ein cylindrisches Kupfergefäß, worin eine gesättigte Lösung von Kupfervitriol enthalten ist. Der Unterschied zwischen beiden Ketten besteht also im Grunde nur darin, daß bei jenem die Lösung des Kupfervitriols sich innerhalb, bei dem letzteren aber außerhalb der porösen Scheidewand befindet. Wenn man mehrere solcher einfachen Ketten mit einander verbindet, so erhält man eine zusammengesetzte Kette von constanter Wirkung. Die Verbindung geschieht dadurch, daß man jeden Zinkcylinder mit dem Kupfergefäße der folgenden einfachen Kette durch einen Draht in Verbindung setzt.

Die Grove'sche Kette besteht aus amalgamirtem Zink und Platin. Die Zinkplatte z z ist so umgebogen, daß sie eine Art Zelle bildet, welche oben und auf beiden Seiten offen ist. In dieser Zelle befindet sich ein prismatischer Trog t t von porösem Thon, welcher mit Salpetersäure angefüllt ist. In die letztere taucht das Platinblech p p. Die Zinkplatte wird nun nebst dem Troge in ein mit Schwefelsäure gefülltes Gefäß von Glas oder Porzellan gesenkt, so daß das Zink von der Flüssigkeit allenthalben umgeben ist. Nach vergleichenden Versuchen, welche Jacobi zwischen der Zink-Platin- und Zink-Kupferkette angestellt hat, ergiebt sich, das 6 Quadratzoll Platinfläche genügen, um eine Säule mit 100 Quadratzoll Kupfer zu ersetzen.

Digitized by Google

Bunsen wählte statt des Platins die Kohle, welche in der Spannungsreihe noch weiter vom Zink entfernt ist. Die von ihm construirte Zinkkohlenkette zeichnet sich sowohl durch ihre kräftige Wirkung als auch durch ihre Wohlfeilheit aus. In ein Glasgefäß g g, welches sich oben etwas verengt, wird ein hohler, unten offener Kohlencylinder k k gestellt, dessen Durchmesser gerade so groß ist, daß zwischen der Kohle und dem obersten Theile des Gefäßes kein merklicher Zwischenraum bleibt. Auf diese Weise wird der Cylinder oben vom Glase festgehalten. Innerhalb des Kohlencylinders befindet sich ein Cylinder t t von poröſem Thon, dessen Wandung unbedeutend von der des erst erwähnten Cylinders absteht. Diese Thonzelle ist unten verschlossen und mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt, während das Glasgefäß so viel concentrirte Salpetersäure enthält, daß sie, wenn man den Thoncylinder hineinstellt, bis oben an den Rand aufsteigt. In die Schwefelsäure der Thonzelle wird endlich ein hohler Zinkcylinder z eingetaucht, welcher durch den Bügel b mit einem Zinkringe in Verbindung steht, der auf dem Kohlencylinder des folgenden Glases aufsitzt. Will man nur ein Element anwenden, so wird dieser Ring weggelassen und statt dessen ein solcher auf den Kohlencylinder des Elementes befestigt und mit dem Zinkcylinder durch einen Draht verbunden. Wenn mehrere Elemente zu einer zusammengesetzten Kette verbunden werden sollen, so wird jeder Zinkcylinder durch einen Zinkbügel mit dem Zinkringe in Gemeinschaft gesetzt, welcher den Kohlencylinder des folgenden Glases umfaßt. Zwei Zinkstreifen, von denen der eine mit dem Zinkringe des Kohlencylinders im ersten Glase und der andere mit dem Zinkcylinder des letzten Glases in Verbindung steht, bilden die Pole der Kette, welche bei der Schließung der letzteren durch einen Draht mit einander verbunden werden.



Die Kohle zu diesem Apparate bereitet man aus einem Gemenge von 1 Theil pulverisirten Coaks und 2 Theilen Steinkohle. Um den Cylinder selbst zu erhalten, wird das Gemenge in den ringförmigen Raum zwischen einer Blechform und einer hinein gestellten Holzschachtel gefüllt und dann bei einem mäßigen Kohlenfeuer ausgeglüht. Wenn sich die Masse nach dem Glühen zerreiblich zeigt, so muß noch ein Zusatz von Steinkohlen erfolgen, zeigt sie sich aber zerklüftet, so setzt

Digitized by Google

man mehr Coaks zu. Dem so erhaltenen Cylinder giebt man durch eine rauhe Feile die gehörige Form und taucht ihn dann, damit er eine hinreichende Härte und Dichtigkeit erhalte, in eine concentrirte Lösung von Zuckerabfällen. Darauf wird er wieder getrocknet und in einem mit Kohlenstücken ausgefüllten, bedeckten, feuerfesten Gefäße der mehrstündigen Einwirkung einer starken Weißglühhitze in einem Töpferofen ausgesetzt. Nach dieser Behandlung wieder auf der Drehbank gehörig gerundet und sein oberes Ende conisch abgedreht, um den Zinkring bequem darauf fest drücken zu können.

205. Die Stärke des galvanischen Stromes ist von verschiedenen Bedingungen abhängig. Wir wissen, daß die Elektricitätsentwickelung zwischen zwei sich berührenden Metallen um so kräftiger sein muß, je größer der Gegensatz zwischen denselben ist. Der feuchte Zwischenleiter ist ebenfalls von großer Bedeutung, wenn wir ihn auch nur als Leiter betrachten. Je besser die Flüssigkeit leitet, desto größer ist die Wirkung, weil Alles, was den Leitungswiderstand der Säule vermindert, ihre Wirksamkeit erhöhen muß.

Die Quantität der Elektricität, welche in der Säule circuliren kann, hängt von der Geschwindigkeit ab, mit welcher das durch den Contact der Metalle entwickelte Elektricum den feuchten Leiter durchströmen kann. Der Widerstand nun, welchen der feuchte Leiter dem Durchdringen des E entgegensetzt, wird begreiflicher Weise verringert durch die Vergrößerung des Querschnittes dieses Leiters, und da die Größe des Querschnittes des feuchten Leiters von der Größe der Plattenpaare abhängt, so sieht man ein, daß die Quantität der Elektricität in der Volta'schen Säule durch die Vergrößerung der Platten vermehrt wird. Ueberhaupt läßt sich die Stärke des Stromes durch die Menge der Elektricität bestimmen, welche in einer gegebenen Zeit durch den Querschnitt des Schließungsdrahtes oder allgemein durch den Querschnitt des Körpers geht, durch welchen die Ausgleichung der elektrischen Zustände stattfindet.

Weil also Alles, was den Durchgang des Elektricums durch den flüssigen Leiter erleichtert, die Stärke des Stromes vermehrt, so folgt von selbst, daß die Quantität der Elektricität um so größer sein muß, je dünner die flüssige Schicht zwischen den Metallplatten ist.

Wenn man die beiden Pole einer Volta'schen Säule durch einen Draht mit einander verbindet, so treibt der Druck des am positiven Pole angehäuften Elektricums, welcher während der Isolirung der Säule frei auf ein angenähertes Elektrometer wirkte, das E durch den Draht nach dem negativen Pole, wohin der Draht sein eigenes E

Digitized by Google

vorausgeschickt hat. Je stärker aber dieser Druck ist, desto größer ist auch die Quantität der Elektricität, welche er durch den Leitungsdraht hindurchtreibt. Berücksichtigt man dabei noch den Leitungswiderstand, welchen der Draht dem Strome entgegensetzt, so folgt, daß die Quantität der Elektricität, welche in einer gegebenen Zeit durch einen bestimmten Schließungsdraht geht, jenem Drucke direct und dem erwähnten Leitungswiderstande umgekehrt proportional ist. Hieraus ergiebt sich die Ohm'sche Formel für die Quantität der Elektricität, welche einen Leiter durchströmt, nämlich

$$S = \frac{E}{W},$$

wenn man durch S die Stärke des Stromes, durch E die Stärke des obigen Druckes und durch W den Leitungswiderstand bezeichnet.

Man sieht leicht ein, daß der Widerstand im Schließungsdrahte sowohl von der Dicke und Länge, als auch von der Leitungsfähigkeit desselben abhängen muß. Den Versuchen zufolge steht er im directen Verhältniß mit der Länge und im umgekehrten mit dem Querschnitt und der Leitungsfähigkeit des Drahtes. Ist also die Länge des letzteren l, der Querschnitt q und die Leitungsfähigkeit k, so hat man

$$W = \frac{l}{q\,k}.$$

Ein Draht von dem Querschnitte q und der Leitungsfähigkeit k kann aber auch durch einen anderen von dem Querschnitte 1 und der Leitungsfähigkeit 1 ersetzt werden, welcher denselben Widerstand wie jener leistet, sofern nur seine Länge $L = \frac{l}{q\,k}$ ist. Man nennt L die reducirte Länge des Drahtes; sie bezeichnet den Widerstand, den der Leitungsdraht als solcher dem elektrischen Strome entgegensetzt. Dies berücksichtigt, hat man $S = \frac{E}{L}$.

Auch der Leitungswiderstand der zwischen den Elementen der Kette befindlichen Flüssigkeit läßt sich auf den Widerstand eines Drahtes von dem Querschnitt 1, der Leitungsfähigkeit 1 und der Länge λ reduciren. Nennt man nun e die elektrische Spannung (sogenannte elektromotorische Kraft), welche dem Strome einer einfachen Kette zu Grunde liegt, so hat man mit Rücksicht auf den Widerstand L im Schließungsdrahte

$$S = \frac{e}{L + \lambda}$$

für die Stromstärke einer geschlossenen, einfachen galvanischen Kette.

Nehmen wir nun die Oberfläche des Elements n mal so groß an,

Digitized by Google

ohne sonst etwas zu ändern, so wird dadurch, wie wir aus dem Früheren wissen, der Leitungswiderstand in dem Element selbst n mal kleiner, weil nämlich der Querschnitt der Flüssigkeit, welche der Strom durchwandert, n mal größer geworden ist. Daher müssen wir in der obigen Formel statt λ jetzt $\frac{\lambda}{n}$ setzen, wodurch dieselbe übergeht in

$$s' = \frac{e}{L + \frac{\lambda}{n}} = \frac{ne}{nL + \lambda}.$$

Ist L oder der Widerstand im Schließungsdrahte sehr klein in Beziehung auf den Widerstand in der Kette, so ist

$$s' = \frac{ne}{\lambda},$$

d. h. die Stromstärke ist in diesem Falle der Oberfläche des elektromotorischen Elements proportional. Eine Vergrößerung der Oberfläche der Platten bringt also unter dieser Bedingung auch eine Vermehrung der Stromstärke hervor.

Wir wollen nun annehmen, eine Säule sei aus n einfachen Ketten, von denen jede die Stromstärke $s = \frac{e}{L + \lambda}$ hat, zusammengesetzt. Der elektrische Druck der aus n solchen Ketten bestehenden Säule wird also gleich ne sein. In demselben Verhältniß ist aber auch der Leitungswiderstand gewachsen, da jetzt in jedem der n Elemente ein Widerstand $= \lambda$ zu überwinden ist. Folglich ist der Widerstand in allen n Elementen zusammen $= n\lambda$. Die Stromstärke der Säule läßt sich also ausdrücken durch die Formel

$$s'' = \frac{ne}{L + n\lambda}.$$

Wenn L sehr klein gegen λ ist, so hat man näherungsweise

$$s'' = \frac{ne}{n\lambda} = \frac{e}{\lambda},$$

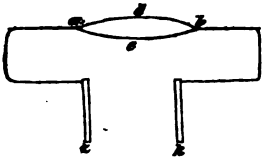
d. h. wenn der Widerstand im Schließungsdraht klein gegen den Leitungswiderstand der einzelnen Kette ist, so wird durch eine Vermehrung der Elemente die Stromstärke nicht vergrößert. Dagegen findet eine solche Vergrößerung statt, wenn der Widerstand L im Schließungsdraht bedeutend ist. Mit wachsender Plattenzahl nimmt zwar die elektrische Spannung zu, aber um eben so viel vergrößert sich auch der Widerstand des feuchten Leiters, da mit jedem neuen Plattenpaare auch eine neue Quantität von Flüssigkeit hinzugefügt wird. Die Quantität der Elektricität bleibt sich also gleich und, sofern die Säule

Digitized by Google

durch einen guten Leiter geschlossen ist, kann man sagen, daß die Vermehrung der Plattenpaare keinen Einfluß auf die Quantität der Elektricität habe. Die Intensität des galvanischen Stromes, welche der Anzahl der Plattenpaare proportional ist, wird aber dann von Bedeutung, wenn man die Säule durch einen schlechten Leiter schließt, weil jetzt eine größere elektrische Spannung an den Polen nöthig ist, um den schlechten Leiter zu durchdringen.

Außer den bisher betrachteten Widerständen ist von Fechner und Poggendorff noch ein anderer Widerstand nachgewiesen worden, welcher überall vorkommt, wo der elektrische Strom von einem Metall auf eine Flüssigkeit übergeht. Man nennt ihn den Uebergangswiderstand, dessen Werth noch dem Nenner des obigen Bruches, welcher die Stromstärke ausdrückt, beizufügen ist. —

Wenn sich der Schließungsbogen einer Kette in zwei Arme adb und aeb theilt, so wird dies mit dem elektrischen Strome eben so der Fall sein. Die Stromstärke in dem ungetheilten Stücke des Leiters sei $= s$, in dem Stücke adb $= s'$, und in aeb $= s''$. Die auf den Querschnitt 1 reducirte Länge des Stückes adb sei $= \lambda'$, die von aeb gleich λ''. Nun kann man den Widerstand in λ'' auch dem eines Drahtes von der Länge λ' und dem Querschnitte q gleich setzen, sofern nur (nach Seite 601) $\lambda'' = \frac{\lambda'}{q}$ oder $q = \frac{\lambda'}{\lambda''}$ ist. Den Drähten adb und aeb kann man dann einen einzigen Draht von der Länge λ' und dem Querschnitte $1 + q$ substituiren, den man wieder durch einen anderen von der Länge λ und dem Querschnitte 1 ersetzen kann, wenn nur $\lambda = \frac{\lambda'}{1+q}$ oder $\frac{1}{\lambda} = \frac{1+q}{\lambda'}$ ist. Führt man in diese Gleichung für q den obigen Werth ein, so ergiebt sich $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda''}$. Nennt man nun den Bruch $\frac{1}{\lambda}$ die Leitungsfähigkeit des betreffenden Drahtes, welche gewiß mit dem Widerstande λ im umgekehrten Verhältnisse steht, so besagt die Gleichung, daß die beiden Aeste eines Leiters einem einzelnen Leiter gleich gelten, dessen Leitungsfähigkeit der Summe der Leitungsfähigkeiten in den Aesten gleich ist.



Da die Ströme s' und s'' bei gleicher reducirter Länge der Drähte durch die Querschnitte 1 und q gehen, während der Hauptstrom s

durch den Querschnitt $1+q$ geht, so hat man auch $s : s' = 1+q : 1$ und $s : s'' = 1+q : q$ oder $s' = \frac{s}{1+q}$ und $s'' = \frac{sq}{1+q}$ oder endlich, wenn man für q seinen obigen Werth setzt, $s' = \frac{\lambda'' s}{\lambda' + \lambda''}$ und $s'' = \frac{\lambda' s}{\lambda' + \lambda''}$.

Durch Addition dieser Gleichungen erhält man $s = s' + s''$, d. h. der Hauptstrom ist gleich der Summe der Nebenströme.

Das Gesagte gilt auch, wenn sich der Leiter in mehr als zwei Theile verzweigt.

206. Das Elektricum der Volta'schen Säule ist eins und dasselbe mit dem der Elektrisirmaschine, der Leidner Flasche und des Elektrophor; während aber die in diesen Apparaten angehäufte Elektricität wegen ihrer bedeutenden Intensität großentheils mit einem Male durch den Entladungsdraht schlägt, liefert die Volta'sche Säule, weil sie sich in den kleinsten Pausen von selbst entladet und wieder ladet, einen continuirlichen Strom von ungleich größerer Wirkung. Gewöhnlich sagt man, daß die Leidner Flasche oder Elektrisirmaschine eine geringe Menge Elektricität von großer Spannung, die Volta'sche Säule aber eine große Menge Elektricität von geringer Intensität darbiete.

Wenn man die Pole einer Volta'schen Säule durch Drähte mit den beiden Belegungen einer noch so großen Batterie verbindet, so wird diese augenblicklich mit der ganzen Intensität der Säule geladen. Man kann hieraus einen Schluß ziehen auf die Menge der Elektricität, welche eine Säule entwickelt.

Die physiologischen Wirkungen der Contactelektricität sind denen der Reibungselektricität im Allgemeinen sehr ähnlich. Wenn man die Hände mit Salzwasser feuchtet und damit die beiden Pole berührt, so erhält man einen Schlag, dessen Stärke mit der Anzahl der Plattenpaare zunimmt. Um ihn zu verstärken, kann man große Metallstücke in die Hände nehmen und damit die Pole berühren oder auch die Hände in zwei mit Salzwasser gefüllte Schalen legen, welche durch Drähte mit den Polen verbunden sind. Beim Oeffnen der Kette erhält man einen zweiten Schlag, welcher aber minder stark ist als derjenige, welcher bei der Schließung der Säule empfunden wird. Auch der Schlag der Volta'schen Säule kann durch mehrere Personen geleitet werden, wenn sie sich mit feuchten Händen berühren. Die Wirkung auf die Nerven kann sehr gesteigert werden, wenn man

Digitized by Google

die Kette in rascher Aufeinanderfolge öffnet und wieder schließt, wozu Reef's sogenanntes Blitzrad zweckmäßig gebraucht werden kann. Auf einer Kupferscheibe, deren verticale Axe mit dem einen Pol der Säule verbunden ist, sind nämlich Einschnitte angebracht, in welche Stücke aus Ebenholz eingefügt sind. Während der Drehung der Scheibe berührt ein Metallstreifen bald das Kupfer, bald das Ebenholz, wodurch die Kette in rascher Abwechselung bald geöffnet, bald wieder geschlossen wird. Auf diese Weise kann man dem Körper leicht in 1 Minute 10000 Trennungs- und eben so viele Schließungsschläge ertheilen, wenn man ihn in den Entladungskreis einschaltet.

Die Muskeln frisch getödteter Thiere werden durch den galvanischen Strom in heftige Zuckungen versetzt. An frischen Leichen von Hingerichteten beobachteten Ure und Albini Bewegungen der Hände und Füße, Oeffnen und Schließen der Augen, und die heftigsten Verzerrungen des Gesichts; selbst der Athmungsproceß wurde durch den Strom auf einige Augenblicke wieder angefacht. Scheintodte und ohnmächtige Thiere werden durch galvanische Schläge wieder in's Leben zurückgerufen. Auch als Heilmittel hat sich der Galvanismus in verschiedenen Krankheiten bewährt, namentlich bei solchen, welche auf einer Lähmung oder Unthätigkeit der Nerven und Gefäße beruhen. Auch soll der Bandwurm durch quer durch den Unterleib geführte Entladungsschläge dergestalt gelähmt werden, daß er bald darauf durch Abführungsmittel fortgeschafft werden kann.

Wenn man ein Zinkstück auf und ein Silberstück unter die Zunge legt, so empfindet man einen eigenthümlichen brennenden oder bitteren Geschmack, wenn man die vorderen Enden beider Metalle mit einander in Berührung bringt. Legt man ein längliches Stück Zink an das Zahnfleisch der oberen Backenzähne und ein Stück Silber an dieselbe Stelle auf der anderen Seite des Mundes, so gewahrt man in dem Augenblick, wo die aus dem Munde hervorragenden Enden der beiden Metalle mit einander in Berührung gebracht werden, einen blitzähnlichen Lichtschein. Man kann auch das eine Metall auf den Augapfel oder auf das angefeuchtete Augenlid legen und das andere in den Mund nehmen. Stärker wird natürlich die Lichterscheinung, wenn man den Strom einer Säule durch die Augen leitet.

207. Metalldrähte, durch welche der galvanische Strom entladen wird, werden erwärmt und wenn sie hinreichend kurz und dünn sind, selbst geschmolzen und unter lebhaftem Funkensprühen verbrannt. Dünne Gold- und Silberblättchen werden verflüchtigt. Die erwärmende Kraft des elektrischen Stromes läßt sich schon an der sehr kleinen Kette zei-

Digitized by Google

gen, welche Wollaston aus einem plattgedrückten silbernen Ringe, in welchem durch Siegellack ein Zinkplättchen befestigt ist, construirte. Verbindet man die beiden Metalle durch ein sehr feines Platinstreifchen, so geräth dieses in's Glühen, wenn man den Apparat bis zur Mitte schnell in eine Säure taucht.

Davy brachte in einen Ballon zwei Kegel von Kohle, welche mit ihren Grundflächen an Metallstäbe befestigt waren. Als der Ballon luftleer gemacht war und die Kohlenspitzen bis zur Berührung genähert waren, wurde der Strom einer kräftigen Säule hindurchgelassen. Allmälig konnte man die Spitzen wieder von einander entfernen, es gingen dann glühende Kohlentheilchen von der einen zu der anderen über und bildeten einen äußerst glänzenden Lichtbogen. Zu derartigen Versuchen ist der Bunsen'sche Apparat sehr geeignet, indem man die Pole mit zwei Kohlenstücken von der Masse der Cylinder und dann die Kohlenspitzen selbst mit einander in Berührung bringt. Ist der Strom einmal im Gange, so kann man die Kohlenstücke beträchtlich weit von einander entfernen, ohne den Strom zu unterbrechen. Durch eine Kette von 40 bis 50 Elementen wird auf diese Weise ein Licht entwickelt, welche das Drumond'sche Kalklicht an Intensität weit übertrifft.

Die erwärmende Kraft des elektrischen Stromes richtet sich hauptsächlich nach der Größe der Metallplatten. Bei Drähten, wie überhaupt bei guten Leitern, ist die Erhitzung um so bedeutender, je kleiner ihr Querschnitt im Verhältniß zur Menge der durchgehenden Elektricität ist. In schlechten Leitern, welche also dem Strom einen größeren Widerstand entgegensetzen, ist die Wärmeentwickelung kräftiger als in guten Leitern.

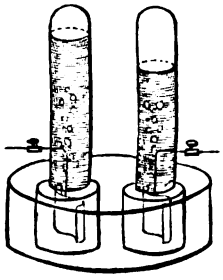
208. Zu den interessantesten und wichtigsten Erscheinungen der Volta'schen Säule gehören die chemischen Wirkungen derselben.

Wenn man die beiden Poldrähte der Säule in ein Gefäß mit Wasser führt, so steigen bald Gasblasen auf und zwar an dem positiven Drahte Wasserstoff-, am negativen Sauerstoffbläschen. Besteht der negative Poldraht aus Zink, so wird er von dem ausgeschiedenen Sauerstoff oxydirt. Eine einfache Kette genügt schon, um die chemischen Wirkungen der Berührungselektricität zur Wahrnehmung zu bringen. Wenn man eine Zinkplatte in verdünnte Schwefelsäure taucht, so bildet sich bekanntlich schwefelsaures Zinkoxyd, während das entbundene Wasserstoffgas an der Platte in die Höhe steigt. Ueberzieht man aber das Zink mit Quecksilber, oder, was dasselbe ist, wendet man eine amalgamirte Zinkplatte an, so wird es von der Säure nicht

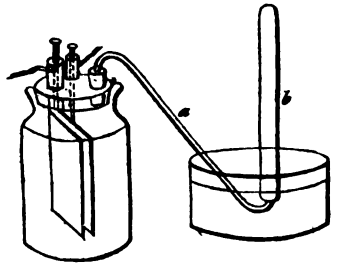
Digitized by Google

angegriffen und es entwickelt sich auch kein Wasserstoff. Man bemerkt nicht die geringste Veränderung, wenn man der Zinkplatte gegenüber eine Kupferplatte in die Flüssigkeit stellt; werden aber die Platten außerhalb der Flüssigkeit in Berührung gebracht oder durch einen Kupferdraht mit einander verbunden, so findet sogleich eine rasche Auflösung des Zinks und eine lebhafte Entwickelung von Wasserstoff statt. Der letztere zeigt sich jedoch nicht wie vorher an der Zink-, sondern an der Kupferplatte, obgleich diese für sich das säurehaltige Wasser nicht zerlegen kann.

Um die Gase getrennt aufzufangen, bedient man sich des nebenstehenden Apparates. Zwei unten offene Glascylinder stehen in zwei Thoncylindern, worin sich gekrümmte Platinplatten befinden. An jede der letzteren ist ein Platindraht gelöthet, welcher zur Seite heraustritt und durch eine Klemmschraube mit dem Schließungsdrahte einer Säule verbunden werden kann. Als Flüssigkeit gebraucht man verdünnte Schwefelsäure, deren specifisches Gewicht gleich 1,34 ist.



Wenn man die beiden Gase zusammen auffangen will, gebraucht man ein cylindrisches Glasgefäß, welches zum Theil mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt und dessen Hals durch einen eingeschliffenen Bleistöpsel verschlossen ist. Durch den letzteren gehen mittelst eingekitteter Glasröhren zwei starke Kupferdrähte, an welche zwei Platinbleche von mehreren Quadratzollen Oberfläche gelöthet sind, die parallel und möglichst nahe einander gegenüber stehen. Mit diesen Kupferdrähten werden die beiden Schließungsdrähte der Säule durch Klemmschrauben verbunden. Die von den Platinblechen aufsteigenden und über der Flüssigkeit sich ansammelnden Gase gehen durch die Röhre a in den Cylinder b. Dies Instrument giebt zugleich ein Maß für die Quantität des durch die Kette zersetzten Wassers und daher auch für die Stärke des Stromes.



Die beiden Gase werden immer in dem Verhältniß ausgeschieden, in welchem sie sich zu Wasser verbinden, so daß sie, mit einander verbunden, wieder Wasser geben.

Digitized by Google

Wenn Oxyde durch den galvanischen Strom zerlegt werden, so erscheint der Sauerstoff wieder am negativen Pol, das Radical am positiven. Leicht reducirbare Metalloxyde werden am bequemsten zersetzt, wenn man auf ein Platinblech, welches mit dem negativen Pol der Säule in Verbindung ist, etwas von dem trockenen pulverförmigen Oxyde legt und dann dieses Pulver mit dem positiven Drahte berührt. Schwerer reducirbare Metalloxyde werden mit etwas Wasser befeuchtet. Nach einiger Zeit erscheinen am positiven Pole kleine, glänzende Metallkügelchen. Wenn man Kali zersetzen will, so höhlt man ein Stückchen davon aus, füllt es mit einem Tropfen Quecksilber und legt es auf das erwähnte Platinblech. Taucht man nun den positiven Poldraht in das Quecksilber, so wird das Kali alsbald zerlegt, der Sauerstoff erscheint am Platinblech, während sich das Kalium mit dem Quecksilber am positiven Drahtende zu einem Amalgam verbindet. Durch Destillation in Steinöl kann das Kalium vom Quecksilber wieder getrennt werden.

Bei der Zerlegung der Chlor-, Jod- und Brommetalle erscheint das Metall wieder am positiven, Chlor, Jod, Brom am negativen Pole. Jodkalium kann schon durch einen sehr schwachen Strom zerlegt werden.

Die Salze werden durch den galvanischen Strom in der Weise zerlegt, daß die Säure am negativen, die Basis oder deren Radical (das metallische Element) am positiven Pole erscheint. Zur Anstellung der Versuche ist eine gebogene Röhre von nebenstehender Gestalt

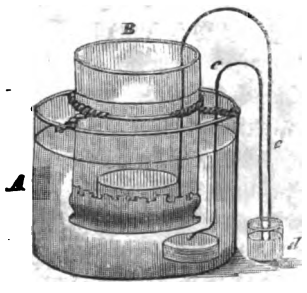
sehr bequem. Man füllt dieselbe mit einer Salzlösung, welche durch eine Lackmustinctur violet gefärbt ist. Wenn man in den einen Schenkel den positiven, in den anderen den negativen Poldraht taucht, so wird die Flüssigkeit an dem negativen Pol, wo die Säure erscheint, roth, am positiven blau gefärbt. Vertauscht man die beiden Drähte mit einander, so nimmt die Flüssigkeit zunächst ihre ursprüngliche violete Färbung wieder an, alsdann erscheint die rothe Farbe in demjenigen Schenkel, wo vorher die blaue war, und umgekehrt, wie man es nicht anders erwarten konnte. Man gieße eine Salzlösung in zwei neben einander stehende Gefäße, welche durch ein feuchtes Asbestgewebe oder durch eine mit der Flüssigkeit gefüllte, gebogene Röhre verbunden sind. Taucht man nun in das eine Gefäß den positiven, in das andere den negativen Poldraht, so erscheint die

Digitized by Google

Säure nach einiger Zeit in dem Gefäße, worin sich der negative Poldraht befindet, die Basis im anderen.

Wenn man ein polirtes Silber- oder Platinplättchen, auf dem sich irgend eine metallische Auflösung, z. B. essigsaures Bleioxyd, befindet, mit dem einen Poldraht einer mehrplattigen Säule in Verbindung setzt, während man das zugespitzte Ende des anderen Poldrahtes dem Plättchen gerade gegenüber hält, so lagern sich die ausgeschiedenen Metalltheilchen in der Form von concentrischen Ringen auf dem Plättchen ab. Diese Ringe wurden zuerst von Nobili beobachtet. Besonders schön erscheinen sie bei einer Mischung von essigsaurem Kupfer mit Salpeter. Läuft der eine Poldraht in mehrere Spitzen aus, so entstehen viele Kreise, welche sich durchschneiden. Nach Fechner kann man diese Ringe, obgleich weniger glänzend, schon hervorbringen, wenn man auf ein Silberplättchen einige Tropfen essigsaures Bleioxyd bringt und dann mit der Spitze eines Zinkstäbchens in der Mitte der Flüssigkeit das Silber berührt.

Wenn man den Strom einer einfachen Volta'schen Kette, z. B. einer Zinkkupferkette, längere Zeit durch eine Auflösung von Kupfervitriol gehen läßt, so schlagen sich die ausgeschiedenen Kupfertheilchen auf der Kupferplatte, welche den positiven Pol der Kette bildet, allmälig dergestalt nieder, daß eine zweite künstliche Kupferplatte entsteht, auf welcher sich die feinsten Erhabenheiten und Vertiefungen der ersten in größter Schärfe ausgeprägt finden. Hierauf beruht die von Jacobi mitgetheilte Galvanoplastik, durch welche plastische Gegenstände, wie Münzen, Gypsabdrücke, Holzschnitte u. dergl. in Kupfer mit vollkommener Treue nachgebildet werden können. Zu diesem Behufe kann man sich des folgenden Apparates bedienen. In ein mit Kupfervitriollösung gefülltes Glasgefäß A hängt ein zweites B, welches unten mit einer Thierblase zugebunden und mit verdünnter Schwefelsäure gefüllt ist. In der letzteren ruht auf einem von Holzstäbchen verfertigten Kreuze ein Zinkblock, welcher durch einen Kupferdraht c mit dem Quecksilbernäpfchen d in Verbindung steht. Ein zweiter Kupferdraht e führt aus dem Quecksilber zu dem nachzubildenden Gegenstande, welcher sich in der Kupfervitriollösung befindet. Es versteht sich von selbst, daß dieser Gegenstand aus einem Stoffe bestehen muß, welcher geeignet ist, den positiven Pol der Kette zu bilden.



Digitized by Google

Anstatt aber das Original selbst anzuwenden, verschafft man sich lieber einen Abdruck desselben in einer Mischung aus Wachs und Stearin, welche man mit etwas fein gepulvertem Graphit zusammenschmilzt. Eine Münze z. B. versieht man mit einem Papierrande, gießt die Flüssigkeit auf und löst dann den vertieften Abguß vorsichtig ab. Um nun denselben leitend zu machen, überzieht man ihn vermittelst eines zarten Pinsels mit geschlemmtem Graphit oder feiner Kupferbronze. Hierauf bringt man die Form in die Kupfervitriollösung, mit der Bildfläche nach oben, und setzt sie mit dem Kupferdrahte in Berührung. Während der Circulation des Stromes setzt sich nun das ausgeschiedene Kupfer langsam auf die Bildfläche in der Nähe des Drahtes ab, welchen man allmälig mit anderen Stellen der Form in Berührung bringt. Damit sich an den Draht selbst kein metallisches Kupfer absetze, überzieht man ihn, so weit er in die Flüssigkeit taucht, mit Schellack oder Siegellack, bis auf diejenigen Punkte, welche mit der Form in Berührung kommen. Der Kupferniederschlag wird natürlich um so gleichförmiger, je langsamer er stattfindet, je schwächer also der elektrische Strom ist. Die zur Anwendung kommende Schwefelsäure muß daher sehr verdünnt sein.

Statt des Wachsabdruckes kann man sich nach Böttger auch einen Abdruck von einem leichtflüssigen Metalle, das aus 8 Theilen Wismuth, 8 Th. Blei und 3 Th. Zinn besteht, verschaffen.

Auf dieselbe Weise wie das Kupfer können auch andere Metalle aus einer passenden Auflösung am positiven Pole niedergeschlagen werden. Soll ein Gegenstand vergoldet werden, so wendet man statt der Kupfervitriollösung eine Lösung von Goldchlorid in Wasser mit unreinem Cyankalium an. Von dem elektrischen Strome wird dann das Gold in äußerst feinen Schichten abgesetzt. Nach etwa 1 Minute nimmt man den Gegenstand heraus, reinigt ihn mit Weinstein unter starkem Reiben und bringt ihn von Neuem in die Goldlösung. Dieses Verfahren wiederholt man von Minute zu Minute, bis die Goldschicht dick genug erscheint. Wesentlich ist es, daß die zu vergoldende Metalloberfläche sehr rein ist. Beim Versilbern gebraucht man eine Lösung von 1 Th. Chlorsilber und 6 Th. Cyankalium in 100 Th. Wasser und verfährt übrigens auf dieselbe Weise wie beim Vergolden. Wenn man eiserne Gegenstände vergolden oder versilbern will, so überzieht man sie zuerst mit Kupfer, wozu man eine Lösung von 1 Th. Kupfervitriol in 12 Th. Wasser mit 2 Th. Cyankalium in 16 Th. Wasser verwendet. Zum Platiniren wählt man nach Fehling am besten eine Lösung von Platinsalmiak in Wasser.

Digitized by Google

Von Kobell in München ist auch ein Verfahren angegeben worden, um in Tuschmanier gemalte Bilder durch die Galvanoplastik zu vervielfältigen. Auf eine übersilberte Kupferplatte werden die Bilder so gemalt, daß die hellsten Parthieen frei bleiben, während die Farbe sonst um so dicker aufgetragen wird, je dunkler der Schatten werden soll. Das Malen geschieht mit einer Farbe, welche man bereitet, indem man Oker oder Coaks mit einer Auflösung von Wachs und Terpentinöl anreibt und etwas Dammarafirniß zusetzt. Das fertige Bild wird mittelst eines zarten Pinsels mit feingeschlemmtem Graphit überzogen und darauf in den Apparat gebracht. Das auf der gemalten Platte abgesetzte Kupfer bildet dann eine zweite Platte, auf welcher alle Lichtparthieen der ersten eben, die Schattenparthieen aber vertieft dargestellt sind. Von dieser Platte kann man sich nun wieder Abdrücke verschaffen, welche mit einer getuschten Zeichnung Aehnlichkeit haben.

Durch die Zerlegungen, welche der galvanische Strom bewirkt, werden auch wieder chemische Verbindungen befördert. So verbindet sich Zink sehr leicht mit dem aus dem Wasser ausgeschiedenen Sauerstoff, wenn es den negativen Pol einer Kette bildet. Chemisch reines Zink löset sich nur sehr langsam in verdünnter Schwefelsäure auf, berührt man es aber mit einem Stück Silber, so bildet sich rasch schwefelsaures Zinkoxyd, während am Silber lebhaft Wasserstoffgas entwickelt wird. Aehnliches ereignet sich, wenn man eine in Salzsäure getauchte Zinkstange mit einem Gold- oder Platinplättchen berührt.

Man sieht aber auch weiter, daß ein Metall, welches für sich in einer Säure oder einer anderen Flüssigkeit auflösbar ist, dadurch, daß man es zum positiven Pole einer Kette macht, vor dem chemischen Einfluß geschützt werden kann. Wenn z. B. die beiden Poldrähte einer Säule aus Zink bestehen und in mit Schwefelsäure gemischtes Wasser getaucht werden, so wird der negative Poldraht in Folge der Zersetzung der Flüssigkeit rasch verzehrt, nicht aber der positive, an dem sich der Wasserstoff abscheidet. Taucht man eine Kupfer- und Zinkplatte in Salzwasser, so werden beide oxydirt; löthet man sie aber zusammen, so wird das Zink viel schneller, als für sich, oxydirt, während das Kupfer, der positive Pol der Kette, gar nicht angegriffen wird. Hierauf beruht Davy's Vorschlag, die kupfernen Beschläge der Schiffe durch Zinkplatten, welche mit ihnen zusammengelöthet sind, vor der Zerstörung durch das salzige Meerwasser zu schützen. Nach Davy ist ein Stück Zink, welches so groß wie der Kopf eines kleinen Nagels ist, schon genügend, um 40—50 Quadrat-

Digitized by Google

zoll Kupfer zu schützen. Dieses Mittel ist jedoch bei Schiffen deshalb nicht anwendbar, weil das Kupfer, wenn es nicht angefressen ist, durch das Anhängen einer Menge von Seegras und Schalthieren verunreinigt wird.

Dasselbe Mittel läßt sich benutzen, um die eisernen Pfannen, worin die Salzsole versotten wird, vor dem Anfressen zu bewahren. Hier werden die Ecken der Pfannen durch ein Brett abgeschnitten und die auf diese Weise gebildeten Zwischenräume mit Zink ausgegossen. Die Flüssigkeit sickert dann in hinreichender Menge durch das Holz zum Zink durch, um die entstandene einfache Kette zu schließen. Das Zink darf deshalb nicht in den Pfannen selbst angebracht werden, weil das gebildete Zinkvitriol sich in der Salzlösung verbreiten würde. Nach Muncke lassen sich die eisernen Pfannen schon gegen die Zerstörung durch Rost schützen, wenn man an die Außenseite derselben lange Zinkstreifen annagelt. Auch Gold und Platin werden durch Zink gegen die Einwirkung des Königswassers geschützt.

Wenn man einen Eisendraht kurze Zeit mit dem negativen Pole einer Volta'schen Säule in Berührung gebracht hat, so wird er von verdünnter Schwefelsäure, deren specif. Gewicht nicht größer als 1,35 ist, nicht angegriffen; auch läßt er sich mit Silber oder Platin zu keiner wirksamen Kette mehr verbinden, er wird, als Poldraht einer Volta'schen Säule gebraucht, nicht oxydirt und zersetzt auch den Kupfervitriol nicht mehr. Schönbein, welcher diesen eigenthümlichen Zustand des Drahtes näher untersucht hat, bezeichnet ihn durch das Wort „Passivität". Derselbe kann ihm auch auf andere Weise, z. B. durch Glühen und Anlaufen in der Luft, beigebracht werden. Umwickelt man den geglühten Theil mit einem anderen Eisendrahte, so theilt er diesem seinen Zustand mit. Mit der Zeit verliert der Draht den passiven Zustand von selbst; derselbe verschwindet aber augenblicklich, wenn man die Salpetersäure auf 88° erhitzt, oder wenn man das aus der Säure hervorragende Ende heftig erschüttert, oder endlich wenn man zwei passive, in derselben Säure befindliche Drähte oben mit einander in Berührung bringt.

Wahrscheinlich gehört diese Erscheinung in eine Klasse mit jener, welche man bei den auf Seite 592 erwähnten secundären oder Ladungssäulen bemerkt. Poldrähte, welche eine Zeit lang zur Zersetzung des Wassers durch den elektrischen Strom benutzt wurden, haben, von der Säule getrennt, die Eigenschaft, daß sie die Wasserzerlegung längere Zeit, oft einige Tage lang, fortsetzen; selbst wenn man sie aus der Flüssigkeit herausnimmt und durch Abwischen reinigt,

Digitized by Google

zeigen sie noch Spuren elektrischer Wirksamkeit. Nach Schönbein ist hierbei nicht allein der elektrische Strom der Säule, sondern auch die chemische Natur der Flüssigkeit, in welche die Drähte eingetaucht sind, von Einfluß. Nach Pfaff's Versuchen kommt die erwähnte Eigenschaft nicht allen Metallen in gleichem Grade zu, am meisten Eisen- und Zinkdrähten, weniger Silber- und Golddrähten, aber gar nicht Messing- und Bleidrähten.

Bei der Zerlegung chemischer Verbindungen durch die Volta'sche Säule erscheinen häufig Producte, welche nicht unmittelbare Wirkungen des elektrischen Stromes sind. Man hat daher die directen Zerlegungen von den indirecten oder secundären wohl zu unterscheiden. So werden Wasser und Chlorwasserstoff (Salzsäure) direct durch den elektrischen Strom zerlegt, indem der Wasserstoff am positiven, der Sauerstoff und das Chlor am negativen Pole hervortritt. Läßt man aber den Strom durch Salpetersäure gehen, so findet eine indirecte Zersetzung statt. Das Wasser wird nämlich zerlegt: am negativen Pole erscheint der Sauerstoff, am positiven der Wasserstoff. Der letztere zersetzt aber sogleich die Salpetersäure, indem er sich mit einem Theil ihres Sauerstoffes wieder zu Wasser verbindet, wodurch dann am positiven Pole salpetrige Säure frei wird. Bei einer Ammoniaklösung vereinigt sich der Sauerstoff des zersetzten Wassers am negativen Pole mit dem Wasserstoff des Ammoniaks, was hier die Entwickelung von Stickstoffgas zur Folge hat. Bei einer wässerigen Jodkaliumlösung erscheint Jod am negativen, Wasserstoff am positiven Pole, indem sich hier das ausgeschiedene Kalium mit dem Sauerstoff des Wassers zu Kali verbindet. So giebt es noch viele andere secundäre Zersetzungsprocesse, welche vorzugsweise bei wässerigen Lösungen eintreten. Schließt man eine Säule, welche zur Wasserzersetzung dient, durch Kohle, so erscheint am negativen Pole statt des Sauerstoffs Kohlensäure und Kohlenoxydgas.

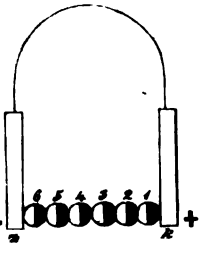
Bei der Beschreibung der verschiedenen Volta'schen Apparate haben wir schon erwähnt, daß die gewöhnliche Volta'sche Säule anfänglich einen sehr kräftigen Strom liefert, welcher aber bald bedeutend abnimmt, daß dagegen die sogenannten constanten Ketten längere Zeit hindurch mit unverminderter Kraft fortwirken. Denken wir uns eine Zink- und eine Kupferplatte, welche durch einen Kupferdraht mit einander verbunden sind, in einer Lösung von Zinkvitriol, so haben wir bekanntlich eine einfache Volta'sche Kette. Das Zinkoxyd der Lösung wird nun zerlegt, der Sauerstoff erscheint am negativen Pole, nämlich an der Zinkplatte, wo er neues Zinkoxyd bildet, während sich

Digitized by Google

am positiven Pole metallisches Zink absetzt, das die Kupferplatte bald ganz überzieht. Hierdurch wird die Berührung des Kupfers mit der Flüssigkeit aufgehoben, dagegen durch den Contact des ersteren mit dem abgesetzten Zink ein dem vorigen gleicher, aber entgegengesetzter Strom erregt. Die Thätigkeit der Kette muß aufhören. Bei Anwendung von verdünnter Schwefelsäure bedeckt sich die Kupferplatte mit einer Schicht von Wasserstoff, welche auf ähnliche Weise wie das abgesetzte Zink eine Schwächung des Stromes bewirkt. Anders ist es in der Becquerel'schen und Daniell'schen, in der Grove'schen und Bunsen'schen Kette. In den beiden ersteren befindet sich die Kupferplatte in einer Lösung von Kupfervitriol, sie wird mit metallischem Kupfer bedeckt und bleibt darum stets mit der Flüssigkeit in Berührung; in der Grove'schen Kette steht das Platin, in der Bunsen'schen die Kohle in Salpetersäure, welche eine eigentliche Entwickelung von Wasserstoff nicht zu Stande kommen läßt, da sich die ausgetretenen Wasserstofftheilchen sogleich wieder mit dem Sauerstoff der Salpetersäure zu Wasser verbinden, wodurch dieselbe in salpetrige Säure übergeht.

209. Die im vorhergehenden §. dargestellten elektro-chemischen Processe lassen sich auf folgende Weise erklären.

Das Elektricum tritt aus dem positiven Pole, wo es angehäuft ist, in die leitende Flüssigkeit. Hier ergreift es nun vorzugsweise denjenigen Bestandtheil, welcher dem Metalle, aus dem es so eben hervorgetreten, hinsichtlich seines chemischen Verhaltens am nächsten liegt. Die Folge davon ist eine Polarisirung der Flüssigkeit, weil alle Atome, auf welche das Elektricum, während es die Flüssigkeit durchwandert, besonders anziehend wirkt, dem positiven Pole, die anderen aber eben dadurch dem negativen Pole zugekehrt werden. Der Versinnlichung wegen sehe man die nebenstehende Figur an, in welcher jedes Kügelchen ein Chlorwasserstoffmolecül vorstellen mag, und zwar die weiße Hälfte das Chloratom, die schwarze das Wasserstoffatom. Der elektrische Strom bringt also vom positiven Pole aus in die Flüssigkeit ein und bemächtigt sich der Wasserstoffatome der zunächst liegenden Chlowasserstofftheilchen, aber wegen der Repulsion zwischen seinen eigenen Elementen geht er weiter in die Flüssigkeit hinein, während neues Elektricum vom Pole nachkommt. Die Wasserstoffatome nun, auf solche Weise vom Elektricum ergriffen, werden den mit ihnen verbundenen Chloratomen entfremdet, es entsteht eine Neigung der ungleichartigen Atome, nach



Digitized by Google

entgegengesetzten Richtungen aus einander zu treten, worin eben die Polarisirung des Chlorwasserstoffes besteht. Durch diese Polarisirung gewinnt aber zugleich das Chloratom eines jeden Molecüls eine stärkere Anziehung für das Wasserstoffatom des folgenden. Sobald nun die Flüssigkeit auf der ganzen Strecke zwischen den beiden Polen durch den elektrischen Strom polarisirt worden ist, tritt, falls der Strom mächtig genug ist, in demselben Moment, in welchem das Wasserstoffatom des Theilchens 1 durch Einwirkung des Elektricums frei wird, auch das Chloratom des Molecüls 6 aus der Verbindung mit seinem Wasserstoffatom hervor, während sich zugleich das Chlor des Theilchens 1 mit dem Wasserstoffatom von 2, das Chloratom von 2 aber mit dem Wasserstoffatom von 3, u. s. f. verbindet.

Das Elektricum, angetrieben den positiven Pol, auf dem es angehäuft ist, zu verlassen, würde unter verschiedenen sich zur Ableitung darbietenden Körpern vorzugsweise denjenigen wählen, welcher es am besten leitet, besonders ein Continuum, das aus demselben Metalle, wie der positive Pol, oder aus einem noch besseren Leiter besteht. Wird nun eine Säule nicht durch einen geschlossenen Metalldraht, sondern durch eine leitende Flüssigkeit, welche sich zwischen den Poldrähten oder den Polen selbst befindet, entladen, so ergreift es hauptsächlich denjenigen Bestandtheil derselben, welcher sich zu ihm auf ähnliche Weise verhält, wie das Metall, das den positiven Pol bildet. Indem nun das Elektricum des einen Atoms der flüssigen Verbindung sich bemächtigt, wird die Verbindung selbst geschwächt und es erfolgt die beschriebene Polarisirung. Wegen der Repulsion zwischen seinen eigenen Elementen kann das Elektricum übrigens keine bleibende Verbindung mit dem erwähnten Bestandtheile eingehen; es muß nach dem negativen Pole hinwandern, während vom positiven Pole immer neues Elektricum nachdringt. Gerade hierdurch ist eine vollständige Polarisirung der Flüssigkeit auf der ganzen Strecke zwischen den beiden Polen und damit auch ein Freiwerden der ungleichartigen Bestandtheile an denselben möglich. Der positive Pol, als solcher, übt keine Anziehung aus, da es vielmehr das Elektricum selbst ist, welches aus dem + Pol hervordringend den einen Bestandtheil des Flüssigen diesem Pole und eben dadurch den anderen gleichzeitig dem negativen Pole zuwendet. Deshalb ist auch die unmittelbare Berührung des Poldrahtes (einer Säule) mit der zu zerlegenden Flüssigkeit nicht durchaus nothwendig, die Bestandtheile der letzteren können auch an einem tropfbaren Körper, welcher mit dem Drahte in Verbindung steht, frei werden, wie dies ein Versuch von Faraday bestätigt. Man theile nämlich ein

Digitized by Google

Glasgefäß von 4 Zoll Durchmesser durch eine Glimmerplatte oben in zwei Fächer und gieße eine concentrirte Lösung von schwefelsaurer Magnesia hinein, bis sie etwa 1 Zoll über den unteren Rand der Scheidewand reicht. Alsdann gieße man in das eine Fach eine Schicht destillirten Wassers vorsichtig auf die Bittersalzlösung, so daß es sich mit dieser nicht mischt. Befindet sich nun in der Salzlösung eine Platinplatte, welche man mit dem negativen Pole einer zusammengesetzten Kette verbindet, während man eine andere mit dem positiven Pole der Kette in Verbindung stehende in das Wasser bringt, so geht das Elektricum von der letzterwähnten Platinplatte durch das Wasser in die Salzlösung und zerlegt diese auf bekannte Weise. Die Magnesia erscheint dann, wie es sein muß, auf der Seite der positiven Polplatte, aber nicht an ihr selbst, sondern an der Grenzfläche des Wassers und der Salzlösung.

Die chemischen Wirkungen der Säule bestehen also ihrem Wesen nach darin, daß der elektrische Strom das chemische Gleichgewicht der Flüssigkeit stört, indem er der chemischen Anziehung eine andere Richtung giebt, dergestalt nämlich, daß mit dem freien Auftreten der ungleichartigen Bestandtheile an den beiden Polen zugleich ein Austausch der zurückbleibenden Atome in derjenigen Richtung verbunden ist, worin die Polarisirung der Flüssigkeit stattfindet.

Nach dem Vorstehenden beginnen also alle chemischen Wirkungen der Säule am positiven Pol, weil gerade hier das E angehäuft ist.

Wie die Chlorwasserstoffsäure, so werden auch die Oxyde durch den galvanischen Strom zerlegt, wobei das Radical (der metallische Theil) am positiven Pole erscheint; denn das Elektricum, aus diesem Pole hervortretend, ergreift das Metall, weshalb der Sauerstoff sich zum negativen Pole hinwenden muß. Es gilt allgemein, daß die metallischen Bestandtheile solcher Verbindungen, welche durch den galvanischen Strom zerlegt werden, am positiven Pole austreten, weil das Elektricum von hier aus, wie schon bemerkt wurde, in die Verbindung eintritt und sich des Metalles sogleich bemächtigt, wodurch dann der andere Bestandtheil am negativen Pole frei werden muß.

Damit irgend eine chemische Verbindung zerlegt werde, ist es nöthig, daß in einer gegebenen Zeit eine bestimmte Quantität von E durch dieselbe gehe. Ist die Stromstärke gering, so kann auch die Polarisirung nur schwach sein, es kommt nicht zu einer wirklichen Zerlegung, sondern es findet nur eine einfache Leitung statt. Dann hängt aber auch von der Stromstärke die Menge ab, welche von einem Körper zersetzt wird. Je größer die Quantität der Elektricität ist, welche

Digitized by Google

in einer bestimmten Zeit durch den Körper geht, desto größer ist auch die Menge der abgeschiedenen Bestandtheile desselben.

Soll ein Körper durch den galvanischen Strom zerlegt werden, so muß er natürlich ein Leiter für das E sein; je besser er das letztere leitet, um so leichter muß er polarisirt und zersetzt werden können. Selbst der flüssige Aggregatzustand, welcher sich durch die vollkommnere Beweglichkeit der Theilchen charakterisirt, muß für die Polarisirung von Bedeutung sein, wie ohne Weiteres einleuchtet. So werden manche Körper, wie Chlorblei, Chlorsilber u. s. w. nur im geschmolzenen Zustande, wo sie Leiter sind, durch den elektrischen Strom zerlegt.

In den Zellen der zusammengesetzten Kette muß natürlich dieselbe Zersetzung stattfinden, wie in der Flüssigkeit, welche zwischen den Polen eingeschaltet ist. Nun ist uns aus dem Früheren bekannt, daß die Quantität der Elektricität, welche die Säule in einer bestimmten Zeit liefert, außer dem Gegensatze zwischen den Metallen, woraus die Kette construirt ist, auch noch von der Leitungsfähigkeit der Flüssigkeit abhängt, welche die Zellen der Kette füllt. Je besser diese Flüssigkeit leitet, je schneller sie folglich zersetzt wird, desto größer ist die Stromstärke der Säule in einer gewissen Zeit. Ist nun das Metall, aus dem das negative Element der Kette besteht, von der Art, daß es sich mit demjenigen Bestandtheile der Flüssigkeit, welcher sich ihm zuwendet, chemisch verbinden kann, so sieht man klar, wie hierdurch die Polarisirung und Zerlegung der flüssigen Verbindung begünstigt werden muß. Zu der Einwirkung des Elektricums auf das eine Atom der Flüssigkeit gesellt sich nun das Streben des negativ elektrischen Metalls (z. B. des Zinks), sich mit dem anderen Atome (Chlor, Sauerstoff ...) zu verbinden, so daß sich hier chemische und elektrische Anziehung gegenseitig unterstützen.

Daß auf die Zersetzbarkeit eines Körpers auch das quantitative Verhältniß seiner Atome und deren Gruppirung von Einfluß ist, versteht sich wohl von selbst. Es liegt die Vermuthung nahe, daß die Polarisirung und Zerlegung einer binären chemischen Verbindung besonders leicht von Statten gehen müsse, wenn man sich die Anordnung der Atome und Molecüle auf eine Weise, wie bei der Chlorwasserstoffsäure u. dergl. denken kann, wenn also immer 1 Aequivalent des einen Elements auf 1 Aequivalent des anderen kommt. Nach Faraday's Versuchen sollen auch nur solche binäre Verbindungen in die Klasse der zerlegbaren Körper gehören, nicht aber Schwefelsäure (1 Aeq. Schwefel und 3 Aeq. Sauerstoff), Salpetersäure (1 Aeq. Stickstoff und 5 Aeq. Sauerstoff) u. s. w., obgleich diese Stoffe als

Digitized by Google

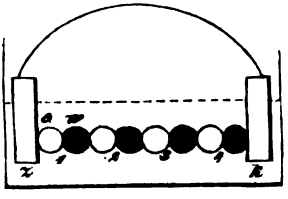
solche aus einem Salze durch den galvanischen Strom ausgeschieden oder durch secundäre Processe zerlegt werden können. Daß ein Körper leichter als der andere, mancher aber gar nicht durch die Kette zerlegt wird, liegt also aller Wahrscheinlichkeit nach theils in der qualitativen Natur der Bestandtheile selbst, theils in dem quantitativen Verhältniß und der Anordnung derselben, weil es in dem einen Falle dem Elektricum leichter werden muß, den entsprechenden Bestandtheil zu ergreifen und dadurch die Verbindung zu polarisiren, als in dem anderen Falle.

Die Menge der zersetzten Theile eines Körpers ist der Quantität der durch ihn gehenden Elektricität proportional. Faraday construirte eine Kette aus einer amalgamirten Zinkplatte und einer Platinplatte, welche in verdünnte Schwefelsäure tauchten, und bestimmte genau das in einer gegebenen Zeit entwickelte Wasserstoffgas. Das Gewicht des letzteren verhielt sich nun zu dem Gewichtsverluste der Zinkplatte wie 1 zu 32,3, ein Verhältniß, das dem der Mischungsgewichte von Wasserstoff und Zink vollkommen gleich ist. Eben so ergab sich, daß, wenn eine zusammengesetzte Kette zur Wasserzerlegung angewendet wurde, für jedes Aequivalent Wasserstoff, welches zwischen den Poldrähten zum Vorschein kam, in jeder Zelle 32,3 Aequivalente Zink aufgelöst worden waren. Leitet man denselben elektrischen Strom durch mehrere Zersetzungsquellen, welche verschiedene zerlegbare Körper enthalten, so stehen die Mengen der abgeschiedenen Bestandtheile im Verhältniß der chemischen Aequivalente zu einander. Enthalten z. B. vier Zerlegungsapparate nach einander Wasser, Chlorsilber, Chlorblei und Chlorzinn, die letzteren im geschmolzenen Zustande, so erscheint dem Gewichte nach an den positiven Polen 1 Wasserstoff, 108 Silber, 104 Blei, 57 Zinn und an den negativen Polen 8 Sauerstoff und 35,4 Chlor. Dasselbe gilt auch für die quaternären Verbindungen, welche sich auf die binären zurückführen lassen.

Nach der chemisch-elektrischen Theorie, wie sie namentlich durch Faraday begründet worden ist, soll der elektrische Strom nur eine andere Art der Aeußerung chemischer Verwandtschaft sein. Die Zersetzung, welche das Zink durch seine Anziehung gegen den einen Bestandtheil der Flüssigkeit bewirkt, ist die Quelle der Elektricität in der Kette und der elektrische Strom die Fortsetzung dieser Zersetzung nach einer bestimmten Richtung. Denkt man sich z. B. eine Zinkplatte in Salzsäure, so wird durch die erwähnte Anziehung den Atomen der zunächst liegenden Salzsäuretheilchen eine bestimmte Richtung oder Polarität verliehen, womit nach Faraday schon das Entstehen eines

Digitized by Google

schwachen Stromes von kurzer Dauer verbunden ist. Aber auch die Zinkatome sollen polarisch werden, und zwar jedes an der der Salzsäure zugekehrten Seite positiv, an der anderen negativ, wenn man das Chlorelement als negativ und das Wasserstoffelement als positiv polarisch betrachtet. Wenn nun die Anziehung zwischen dem positiven Zink- und dem negativen Chloratom mächtig genug ist, so entsteht Chlorzink, welches sich in der Salzsäure auflöst, während der positive Wasserstoff als Gas an der Oberfläche der Zinkplatte entweicht. Stellt man nun dem Zink eine Kupferplatte gegenüber und verbindet beide durch einen Metalldraht, so muß natürlich noch etwas von der entgegengesetzten Seite her hinzukommen, um die Erklärung der Volta'schen Erscheinungen zu vervollständigen. Darum soll jene Polarität der Zinkatome sich durch den Draht bis zu den letzten Atomen der Kupferplatte fortpflanzen, so daß diese in Beziehung auf das positive Zinkende negativ polar werden. Hierdurch wird die Polarität der zwischen ihnen befindlichen Salzsäure, welche in allen Theilchen gleich groß ist, verstärkt; in demselben Moment nun, in welchem sich das Chlor des Theilchens 1 mit einem Zinkatom verbindet, vereinigt sich der Wasserstoff desselben Theilchens mit dem Chlor von 2, das Wasserstoffatom von 2 aber mit dem Chlor von 3 und so fort bis zur Kupferplatte, an der das Wasserstoffatom des Theilchens 4 frei werden muß, da es zu dem Kupfer keine Affinität besitzt.



Der wahre Grund der Polarität der Metallatome, die Art und Weise, wie sich diese Polarität vom Zink in Folge des chemischen Processes durch den Draht bis zu dem Ende der Kupferplatte fortpflanzt, ist nach dieser Hypothese unerklärt geblieben. Ein wahres Element oder ein wahres Atom kann nicht an seinen entgegengesetzten Hälften entgegengesetzte Eigenschaften oder Polarität haben, es widerstreitet dies dem Begriffe desselben; eigentliche Polarität kann nur bei einem Massentheilchen oder Molecül vorkommen, welches zwei entgegengesetzte Bestandtheile enthält, die eine Anordnung zulassen, wie wir sie bei der Erklärung des Magnetismus angenommen haben. Ebenso findet der Begriff der Polarität auf die Salzsäure, welche aus Chlor und Wasserstoff besteht, und auf andere zusammengesetzte Körper Anwendung, in so fern ihre Bestandtheile durch die elektrische Thätigkeit einen Antrieb erhalten, nach entgegengesetzten Richtungen aus einander zu treten. Nimmt man eine Zusammengesetztheit der Metalle an, so läßt

Digitized by Google

ſich jener Hypotheſe ſchon eher durch die Analogie mit dem Magneten nachhelfen, wiewohl auch dann noch eine große Dunkelheit hinſichtlich der Art und Weiſe zurückbleiben würde, wie die Polarität der Maſſentheilchen durch verſchiedene Metalle hindurch zur Wirklichkeit kommt, und zwar eine ſolche Polarität, welche den Erſcheinungen der Volta'ſchen Kette genügt. Setzt man bei dieſer Hypotheſe die Vorſtellung eines elektriſchen Fluidums gänzlich bei Seite, ſo müſſen auch alle bisher beſchriebenen elektriſchen Erſcheinungen, welche wir durch die Annahme eines einzigen Elektricums erklärt haben, ihren Grund in einem polaren Zuſtand der kleinſten Maſſentheilchen finden, welcher, ſobald er in einem hervorgetreten, ſich auf die benachbarten fortpflanzt. Tritt nun dieſer polare Zuſtand auch ſchon bei der Berührung zweier ungleichartigen Metalle hervor, ſo iſt dies die Elektricitätsentwickelung durch Contact, und wenn zwei Metalle, welche durch einen Draht verbunden ſind, in eine Flüſſigkeit tauchen, ſo pflanzt ſich die Polarität jener in dieſe fort, wozu ſich dann die durch die chemiſche Action des einen Metalls veranlaßte Polarität geſellt. In dieſem Sinne ſind beide Theorien nicht weſentlich verſchieden. Nach der Contacttheorie iſt dann der elektriſche Strom eine Folge der durch den Contact der beiden Metalle hervorgerufenen Polarität, nach der chemiſch-elektriſchen Theorie ein Zuſtand des geſtörten chemiſchen Gleichgewichts, in ſo fern die Polarität der Metalltheilchen erſt durch die chemiſche Action veranlaßt wird.

Der Gedanke, die elektriſchen Erſcheinungen durch einen polaren Zuſtand der kleinſten Maſſentheilchen zu erklären, iſt wohl einer weiteren Verfolgung werth, aber es iſt ſehr die Frage, ob der Begriff der Polarität in einem ſo ausgedehnten Sinne, wie es der angegebene Zweck erfordert, zu einer erſprießlichen Anwendung kommen kann. Wir finden eine wahre Polarität bei allen durch die Volta'ſche Kette zerlegbaren Körpern, ſo lange ſie der Einwirkung des elektriſchen Stromes unterliegen; ſonſt treffen wir zwar im Gebiete der Elektricität faſt allenthalben auf entgegengeſetzte elektriſche Zuſtände, nicht aber auf den ſtrengen Begriff der Polarität, wie ihn die Vorſtellung des Magnetismus einſchließt. Die Erſcheinungen des letzteren nöthigten uns, ſein Weſen in einen polaren Zuſtand der kleinſten Maſſentheilchen der betreffenden Körper zu ſetzen. Richtet man aber die Aufmerkſamkeit gleichmäßig auf alle elektriſchen Erſcheinungen oder auch nur auf alle bisher beſchriebenen, ſo läßt ſich die Vorſtellung eines elektriſchen Fluidums auf keinen Fall zurückweiſen, und zwar nicht blos der bildlichen Darſtellung wegen.

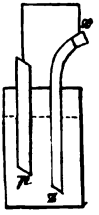
Bringt man eine Zink- und eine Kupferplatte mit einander in

Digitized by Google

Berührung, so wird die eine negativ, die andere positiv elektrisch; dies ist von keinem chemischen Processe abhängig. Befinden sich nun beide Platten, durch einen Kupferdraht verbunden, in Salzsäure, so geht das Elektricum von der Kupferplatte in die Flüssigkeit, welche es auf die früher angegebene Weise polarisirt und zerlegt, ein Vorgang, der ohne Zweifel durch die Anziehung des Zinks zum Chlor sehr begünstigt werden muß. Der Strom in der Kette ist hiernach ein Zustand des gestörten elektrischen Gleichgewichtes, welcher aber beinahe unmittelbar mit einer Störung des chemischen Gleichgewichtes verbunden ist. Allerdings kann auch durch die Zerlegung der Flüssigkeit Elektricität entwickelt werden; diese wird die ursprüngliche Stromstärke vermehren oder unter Umständen auch vermindern. Nach der chemischen Hypothese wird der Strom, falls sie ein elektrisches Fluidum anerkennt, erst durch chemische Einwirkung der Flüssigkeit auf das Metall erregt. Diesem widerspricht aber entschieden der Volta'sche Fundamentalversuch. Pfaff stellte selbst in verschiedenen trockenen Gasen mit einem Zinkkupferelemente Versuche an, welche unzweideutige Resultate gaben. Ein chemischer Einfluß kann hier nicht ohne großen Zwang in Anspruch genommen werden. Auch das von Faraday entdeckte Gesetz, daß eine bestimmte Menge von Elektricität die Bestandtheile zusammengesetzter Körper in demselben Verhältniß ausscheidet, in welchem ihre Mischungsgewichte zu einander stehen, läßt sich nicht als ein Grund für die Richtigkeit der chemischen Hypothese anführen. Denn dieses Gesetz hängt genau mit der Art und Weise zusammen, wie wir uns die Polarisirung und Zerlegung der chemischen Verbindungen erklärt haben; überdies tritt dasselbe auch bei solchen elektrischen Strömen hervor, welche einen ganz anderen Ursprung haben, wie bei den magneto-elektrischen, die wir etwas später werden kennen lernen. Außerdem wissen wir, daß die Elektricitätsentwickelung durch Contact nicht allein auf die Metalle beschränkt ist, obgleich sie bei ihnen aus bekannten Gründen am stärksten hervortreten muß, daß vielmehr überall, wo ungleichartige Körper sich berühren, eine elektrische Spannung entstehen muß, wenn auch oft von so geringer Intensität, daß sie kaum in unsere Wahrnehmung fallen kann. Von Bedeutung aber ist schon die Elektricitätsentwickelung bei der Berührung von Metallen und Flüssigkeiten, wie dies die Becquerel'sche Kette zeigt. Dieselbe wird erhalten, wenn man ein poröses Thongefäß mit Kalilauge in ein anderes mit Salpetersäure stellt und nun in beide Flüssigkeiten gleiche Platinplatten taucht, die man durch einen Platindraht mit einander verbindet. Der Contact des Platins mit den beiden Flüssig-

Digitized by Google

keiten ist die Hauptquelle des elektrischen Stromes in dieser Kette. Stellt man nach Faraday in ein Glas, welches verdünnte Salpetersäure mit etwas Schwefelsäure enthält, eine Zinkplatte und ein Platinblech, so wird das Zink durch den Contact mit der Flüssigkeit positiv, das Platin aus demselben Grunde negativ elektrisch. Es geht demnach ein elektrischer Strom vom Zink durch den an p angelötheten Platindraht. Legt man nun bei x auf die oben umgebogene Zinkplatte ein mit Jodkalium befeuchtetes Fließpapier, mit dem man den Platindraht in Berührung bringt, so wird an diesem auf bekannte Weise alsbald das Jod frei, während das Alkali am Zink erscheint, wie ein mit Curcuma gefärbtes Papier, das man unter das Fließpapier legt, sogleich zu erkennen giebt. So lassen sich alle Erscheinungen, welche man zu Gunsten der chemischen Hypothese angeführt hat, aus der Elektricitätsentwickelung erklären, welche durch den Contact von Metallen und Flüssigkeiten veranlaßt wird.



Von Faraday ist auch eine besondere Terminologie der elektrochemischen Erscheinungen aufgestellt worden, welche wir hier, da sie nicht selten vorkommt, noch anführen wollen. Die Pole nennt er Elektroden (von ὁδος, Weg), weil sie gewissermaßen die Ein- und Austrittswege des elektrischen Stromes sind, den negativen Pol insbesondere die Anode, den positiven die Kathode. Die durch den Strom zerlegbaren Körper heißen Elektrolyten, die Producte der Zerlegung Jonen, und zwar die an der Kathode erscheinenden Kationen, die an der Anode auftretenden Anionen.

210. In dem Entladungskreise der Volta'schen Säule beobachtet man mitunter merkwürdige Bewegungen, welche ihren Grund in der Wirkung zwischen den Poldrähten und den Bestandtheilen des eingeschalteten flüssigen Körpers haben. Diese Erscheinung wurde zuerst von Erman und später von Herschel, Pfaff, Runge und Nobili genauer beobachtet. Bedeckt man nämlich wohl gereinigtes Quecksilber, welches sich in einer flachen Schale befindet, mit einer dünnen Schicht einer leitenden Flüssigkeit, z. B. mit Schwefelsäure oder einer Lösung von Aetzkali, und bringt mit dieser die Poldrähte einer Volta'schen Säule in leitende Verbindung, so entstehen strömende Bewegungen, die nach den Umständen bald von dem einen, bald von dem anderen Poldrahte, bald von beiden auszugehen scheinen. Bei einer concentrirten Säure wird das Quecksilber vom negativen Pole weggetrieben, bei einer alkalischen Flüssigkeit gewissermaßen ange-

Digitized by Google

zogen. Steht der negative Poldraht mit der alkalischen Lösung, der positive durch diese Flüssigkeit hindurch mit dem Queckſilber in Berührung, ſo plattet ſich das letztere ab und es entſteht eine lebhafte Strömung vom negativen Drahte nach dem positiven hin, welche auch dann noch einige Zeit fortdauert, wenn man den positiven Poldraht bis in die Flüſſigkeit zurückgezogen hat. Berührt aber der negative Poldraht das Queckſilber, ſo erfolgt eine Contraction des letzteren, indem es ſeine convexe Form wieder annimmt, es oxydirt ſich und wird an ſeiner Oberfläche zähe. Wenn man Queckſilber mit 1 Linie dicken Schicht geſättigter Kochſalzlöſung bedeckt und einen kleinen Kryſtall von Kupfervitriol vorſichtig darauf legt, ſo wird das Queckſilber allmälig matt und mit einer Oxydhaut überzogen; berührt man es aber durch die Salzlauge mit einem blanken Eiſendraht, ſo verliert ſich die Haut wieder und es entſtehen Strömungen, welche ſo lange anhalten, bis der Kryſtall ganz verzehrt iſt. Wahrſcheinlich hängen jene Bewegungen auch von der Art und Weiſe ab, wie die Elektricität von dem einen Drahte (durch die Flüſſigkeit) zu dem anderen übergeht. Man ſieht ein, daß das Ausſtrömen des Elektricums, wenn einmal der Uebergangswiderſtand überwunden iſt, leichter geſchehen muß als das Einſtrömen und das damit verbundene Zuſammenziehen deſſelben in einen Leitungsdraht. Denn indem ſich das Elektricum an der Drahtſpitze anhäuft, gerathen ſeine Elemente wider einander in Repulſion, welche der ferneren Anſammlung des E für den Augenblick eine Grenze ſetzt. Sobald aber die Ableitung durch den Draht weit genug vorgeſchritten iſt, entſteht ſofort eine neue Verdichtung, welche eine abermalige Repulſion veranlaßt, u. ſ. w. Gerboin brachte nun Queckſilber in den Biegungswinkel einer doppelſchenkligen Glasröhre, darüber Waſſer und leichte Körperchen von verſchiedener Art. Als er hierauf die Poldrähte einer Volta'ſchen Säule in's Waſſer führte, wurden die Körperchen in der Nähe des negativen Poles, nicht aber am poſitiven Pole, in Bewegung verſetzt. Das Elektricum geht nämlich vom poſitiven Poldrahte ziemlich gleichförmig in's Waſſer, ohne in demſelben eine merkliche Bewegung hervorzubringen, und von da in's Queckſilber; beim Uebergange aus dem letzteren in den negativen Draht entſtehen dagegen jene abwechſelnden Attractionen und Repulſionen und daher mitgetheilten Bewegungen der kleinen Körperchen.

211. Oerſted machte im Jahre 1820 die folgenreiche Entdeckung, daß die Magnetnadel durch einen continuirlichen elektriſchen Strom abgelenkt werde. Um den Verſuch anzuſtellen, führe man den

Digitized by Google

Schließungsdraht einer einfachen Volta'schen Kette, in welcher bekanntlich der Strom vom Kupfer durch die Flüssigkeit zum Zink und von diesem durch den Draht zum Kupfer geht, in der Richtung des magnetischen Meridians nahe bei einer freischwebenden Magnetnadel vorüber. Alsbald wird dieselbe aus ihrer gewöhnlichen Ruhelage abgelenkt und zwar so lange, als die Kette geschlossen ist. Die Ablenkung geschieht nach folgenden Hauptgesetzen.

Wenn der elektrische Strom in dem Schließungsdrahte von Nord nach Süd geht und die Nadel sich in einer Verticalebene nahe unter ihm befindet, dergestalt also, daß die Axe der horizontalen Nadel mit der Richtung des Drahtes parallel ist, so weicht sie mit ihrem Nordende nach West ab. Befindet sich aber die Nadel unter sonst gleichen Umständen über dem Drahte, so weicht ihr Nordende nach Osten ab.

Steht die Magnetnadel bei derselben Richtung des Stromes in gleicher Höhe mit dem Drahte, befinden sich also beide in einer und derselben Horizontalebene, so wird nicht ihre Abweichung, sondern ihre Neigung verändert, und zwar wird der Nordpol herabgezogen, wenn der elektrische Strom oder der Draht an der Westseite der Nadel vorbeigeht, dagegen aufwärtsgehoben, wenn er an der Ostseite der Nadel hingeht.

Bewegt sich der elektrische Strom von Süd nach Nord, so erfolgen alle diese Ablenkungen in entgegengesetzter Richtung, indem die westliche Abweichung eine östliche wird, u. s. w.

Nicht allein der horizontale, sondern auch der vertical auf- oder abwärts gerichtete Strom lenkt die Magnetnadel ab, und zwar bald in dem einen, bald in dem anderen Sinne, je nachdem sich der angenäherte Pol auf dieser oder jener Seite des Drahtes befindet. Bei einem abwärts gerichteten Strom sind die Ablenkungen durchweg die entgegengesetzten von denjenigen, welche man bei einem aufwärts gehenden beobachtet.

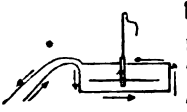
Um sich hinsichtlich der Beziehung zwischen der Richtung des Stromes und der Richtung der Ablenkung leicht zurecht finden zu können, hat Ampère eine einfache Regel angegeben. Man denkt sich nämlich eine kleine menschliche Figur in den Draht so gelegt, daß der Strom immer bei den Füßen ein- und am Kopfe austritt und das Gesicht gegen die Magnetnadel gekehrt ist. Der Nordpol der letzteren erscheint dann stets nach der linken Seite hin abgelenkt. Wenn die Nadel sich über dem Strom befindet, so liegt die Figur auf dem Rükken, dagegen auf dem Leibe, falls der Strom über der Nadel vorbei-

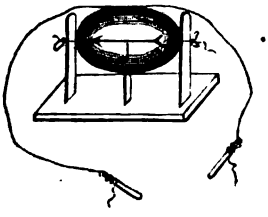
Digitized by Google

geht. Für einen vertical aufsteigenden Strom steht die Figur auf den Füßen, bei einem niedergehenden auf dem Kopfe.

Aus den angeführten Erscheinungen folgt, daß der elektrische Strom der Magnetnadel eine Richtung zu ertheilen sucht, welche auf der seinigen senkrecht ist. Diesem Streben wirkt der Erdmagnetismus entgegen, indem er die Nadel in den magnetischen Meridian zurückzudrehen sucht. Je größer aber die Stromstärke und je näher die Nadel dem Schließungsdrahte ist, desto mehr nähert sich der Winkel, welchen die Nadel mit dem elektrischen Strom oder mit dem magnetischen Meridian macht, einem rechten.

Giebt man dem Schließungsdrahte die Form eines Rechteckes, innerhalb dessen sich die Nadel befindet, so wirken der untere Theil des oberen und der obere Theil des unteren horizontalen Drahtstückes in demselben Sinne auf die Pole der Nadel, was auch von den beiden verticalen Drahtstücken gilt. Geht nun ein zweiter Strom von derselben Stärke und in derselben Richtung, wie der erste, um die Nadel, so muß er auf die letztere auch dieselbe Wirkung äußern. Wenn daher ein Draht in vielen Windungen um die Nadel herumgeht, welche alle von demselben Strom durchlaufen werden, so ist nach dem Vorstehenden klar, wie hierdurch die Wirkung auf die Nadel verstärkt werden muß. Hierauf beruht der von Schweigger und gleichzeitig von Poggendorff construirte Multiplicator oder das Galvanometer. Man windet einen langen Kupferdraht, der mit Seide dicht übersponnen ist, damit sich der elektrische Strom nicht seitwärts mittheile, auf einen rechtwinkligen Rahmen von Holz oder Metall auf, so daß nur die beiden Enden des Drahtes frei bleiben. Die Nadel hängt innerhalb der Drahtwindungen an einem Coconfaden. Häufig giebt man den Drahtwindungen auch die Form einer ovalen Schleife, die man mittelst seidener Schnüre an ein Gestell von lackirtem Holze befestigt. Die Unterlage desselben trägt in der Mitte eine verticale feine Spitze, auf welcher die Magnetnadel ruht. Um Luftströmungen abzuhalten, befindet sich der Apparat unter einer Glasglocke. Will man nun einen Versuch anstellen, so giebt man jenem Rahmen oder der Drahtschleife eine mit dem magnetischen Meridian parallele Richtung und bringt die Drahtenden in genaue leitende Verbindung mit den Polen einer Volta'schen Kette.

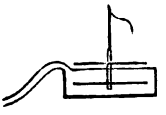


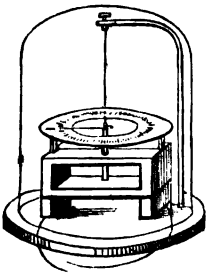


Digitized by Google

Alsbald wird die Nadel aus dem magnetischen Meridiane abgelenkt, und zwar um so mehr, je größer die Menge der circulirenden Elektricität ist. Die Ablenkung ist je nach der Richtung des Stromes eine östliche oder westliche.

Von Nobili wurde die Empfindlichkeit dieses Instrumentes dadurch sehr erhöht, daß er statt einer Nadel zwei in Anwendung brachte, die dergestalt an einer gemeinschaftlichen verticalen Axe befestigt sind, daß dem Nordpole der einen der Südpol der anderen entspricht. Eine solche astatische Magnetnadel ist der Einwirkung des Erdmagnetismus fast gar nicht unterworfen und wird nur noch durch die geringe Differenz der ungleichen Richtungskräfte der beiden Nadeln in der Richtung des magnetischen Meridians erhalten. Die obere Nadel spielt über einem Kreise, der in 360 Grade eingetheilt ist, und zeigt im gewöhnlichen Zustande auf den Nullpunkt, wenn man die gerade Linie, welche die Theilstriche 0° und 180° mit einander verbindet, in den magnetischen Meridian gebracht hat.

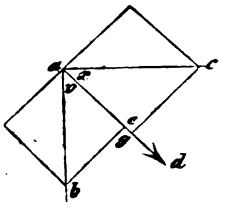




Uebrigens ist derselbe Multiplicator nicht für alle Ströme gleich brauchbar; seine Construction ist größtentheils durch die Kette bedingt, mit der er verbunden werden soll. Für Ströme von schwacher Spannung, die auch nur einen geringen Leitungswiderstand überwinden können, wendet man ein Galvanometer mit dickem Drahte von nur wenigen Windungen, oder nach Fechner einen einfach gebogenen Kupferstreifen an. Bei Strömen von starker Spannung, aber geringer Elektricitätsmenge gebraucht man dagegen einen sehr langen Draht, der sehr viele Windungen zu bilden vermag.

212. Man wird schon bemerkt haben, daß man aus dem Winkel, um welchen die Nadel vom magnetischen Meridian abgelenkt wird, auf die Stromstärke schließen kann. Wir wollen nun annehmen, eine Kette sei durch einen gleichförmig dicken, breiten Kupferstreifen geschlossen, dessen Länge seine Breite fünf Mal übertrifft, während die darüber schwebende Magnetnadel eine Länge hat, welche gleich dem vierten oder fünften Theile der Streifenbreite ist. In diesem Falle wirkt der Strom, welcher den Streifen seiner ganzen Breite nach gleichmäßig durchfließt, auf die Nadel bei jeder Stellung in der nämlichen Weise ein. Man stelle sich ferner unter ab = T die Größe und Richtung der erdmagnetischen Kraft, unter ac = S der Größe und Richtung

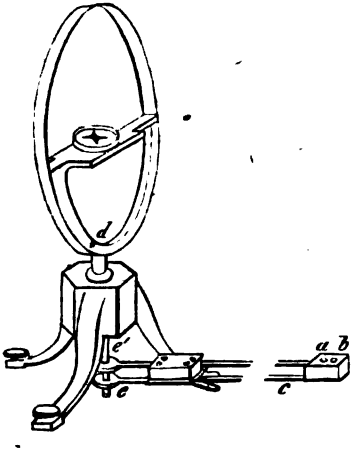
Digitized by Google



nach die Kraft vor, mit welcher der elektrische Strom der Magnetnadel eine Richtung zu ertheilen sucht, welche auf der seinigen oder auf der Richtung des magnetischen Meridians senkrecht ist. Ist nun a d die Richtung, welche die Nadel unter dem Einfluß dieser Kräfte annimmt, so ist v der Winkel, um welchen die Nadel vom Meridian abgelenkt worden, und x der Winkel, welchen die ablenkende Kraft des Stromes mit der Nadel macht. Jede der erwähnten Kräfte läßt sich in zwei andere zerlegen, von denen die eine mit der Nadel parallel, die andere dazu senkrecht ist. Nur die letztere, nicht aber die erste ist von Bedeutung für die Lage der Nadel. Man hat nun b e = T sin v und c g = S sin x. Da diese Kräfte einander entgegenwirken, so ist offenbar für die Gleichgewichtslage der Nadel T sin v = S sin x. So fern nun die Richtung des Stromes mit dem magnetischen Meridian zusammenfällt, ist v + x = 90° und daher auch sin x = cos v. Setzt man diesen Werth in obige Gleichung, so folgt T sin v = S cos v und hieraus S = T . tang. v.

Die Stromstärke ist also der Tangente des Ablenkungswinkels proportional.

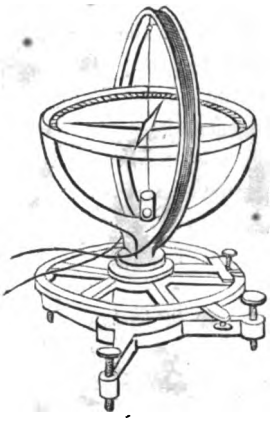
Auf diesen Satz gründet sich die Tangentenbousssole. Der Strom circulirt hier in einem breiten, kreisförmigen Kupferstreifen, in dessen Mitte sich eine Compaßnadel befindet, deren Länge 4 oder 5 Mal kleiner als der Durchmesser des Ringes ist. Zwei Quecksilbernäpfchen a und b stehen mit den Poldrähten der Kette in Verbindung. Der Strom geht von b durch den Kupferdraht c e und den verticalen Stab e d, durchläuft den Ring und kehrt durch eine Röhre d e', welche jenen Stab umgiebt, ohne ihn zu berühren, und durch den Draht e' a zurück. Beim Gebrauche stellt man dieses Instrument so auf, daß die Ebene des Ringes mit dem magnetischen Meridian zusammenfällt. Anstatt die Ablenkung der kleinen Compaßnadel unmittelbar zu beobachten, kann man bequemer die Ablenkung einer langen, aber sehr



Digitized by Google

leichten Kupfernadel, welche ſenkrecht zu der Magnetnadel befeſtigt iſt, auf dem Theilkreiſe ableſen.

Ein anderes Inſtrument zur Meſſung der Stromſtärke iſt die von Pouillet angegebene und von Poggendorff weſentlich verbeſſerte Sinusbouſſole. Hier iſt der Multiplicatordraht um einen verticalen, drehbaren Kreis gewunden. Die Magnetnadel hängt an einem Faden. Um aber das Schwanken der Nadel und die Torſion des Fadens möglichſt zu beſeitigen, iſt unter der Nadel in gleicher Richtung mit dem erſten ein zweiter Faden befeſtigt, welcher durch eine kleine Kugel, die in einem engen Glascylinder hängt, geſpannt wird. Zunächſt ſtellt man das Inſtrument ſo auf, daß die Ebene der Drahtwindungen mit dem magnetiſchen Meridian zuſammenfällt. Der Inder des unteren horizontalen Kreiſes, auf dem man die Drehung des verticalen ablieſt, ſteht dann auf dem Nullpunkte. Leitet man einen Strom durch die Drahtwindungen, indem man die Enden des Drahtes mit den Polen einer Kette verbindet, ſo erfolgt alsbald eine Ablenkung der Nadel.



Hierauf dreht man den verticalen Kreis in der Richtung der Ablenkung ſo lange, bis die Nadel wieder in die Ebene der Windungen zu liegen kommt. Alsdann lieſt man den Unterſchied dieſer und der vorigen Stellung auf dem unteren Horizontalkreiſe ab, woraus ſich ohne Weiteres die Ablenkung der Nadel ergiebt. Bei dieſem Inſtrumente iſt alſo der Winkel, welchen die Nadel mit dem Strome macht, gleich Null, folglich nach den Betrachtungen auf Seite 627 $\sin x = \cos v = 1$, wo x den eben erwähnten Winkel und v den Winkel bezeichnet, welchen die Nadel mit dem magnetiſchen Meridian macht. Daher hat man hier ſtatt der Formel $T \sin v = S \cos v$, welche für die Tangentenbouſſole gilt, $S = T \sin v$.

Bei dieſer Vorrichtung iſt alſo die Stromſtärke dem Sinus des Ablenkungswinkels proportional.

Die beiden ſo eben betrachteten Inſtrumente ſind zum Meſſen der Stromſtärke ſehr geeignet, weil bei ihnen die letztere in einem einfachen Verhältniß zum Ablenkungswinkel ſteht. Dies gilt nicht für das zuerſt beſchriebene Galvanometer, bei dem der Draht um einen parallelopipediſchen Rahmen gewunden iſt. Doch hat Poggendorff

Digitized by Google

ein Verfahren angegeben, um es auch zu genaueren Messungen brauchbar zu machen, nachdem zuvor die Einrichtung so getroffen ist, daß sich die Drahtwindungen, wie bei der Sinusbouſſole, um eine verticale Axe drehen lassen, wodurch sie jederzeit mit der Nadel parallel gestellt werden können.

213. Mit Hülfe der Tangentenbouſſole kann man sich auf dem Wege des Versuches eine Bestätigung des früher erörterten Ohm'schen Gesetzes verschaffen. Man schließe eine constante Kette durch die Tangentenbouſſole und notire die entstandene Ablenkung, welche 62° betragen mag. Alsdann schalte man der Reihe nach gleich dicke Kupferdrähte von verschiedener Länge ein und beobachte die entsprechenden Ablenkungen. Sei nun die Länge des eingeschalteten Drahtes ein Mal 5, ein ander Mal 10 Meter, die Ablenkung im ersten Falle 40½° und im zweiten 28½°. Der Widerstand, welchen die Kette und die verschiedenen Theile der Bouſſole dem elektrischen Strome entgegensetzen, läßt sich dem Leitungswiderstande eines Kupferdrahtes von der Dicke des eingeschalteten und der Länge x gleich achten. Die Widerstände in unseren drei Versuchen sind also nach einander x, x + 5, x + 10 und die entsprechenden Stromstärken $\frac{E}{x}$, $\frac{E}{x+5}$, $\frac{E}{x+10}$. Da sich nun die Stromstärken wie die Tangenten der Ablenkungswinkel verhalten, so hat man, wenn man den ersten Versuch mit dem zweiten vergleicht: $\frac{E}{x} : \frac{E}{x+5}$ = tang. 62° : tang. 40½° oder x + 5 : x = 1,880 : 0,849 und bei der Vergleichung des ersten mit dem dritten $\frac{E}{x} : \frac{E}{x+10}$ = tang. 62° : tang. 28½° oder x + 10 : x = 1,880 : 0,543. Aus der letzten Proportion ergiebt sich x = 4,06, ein Werth, der nur wenig von demjenigen abweicht, welchen die erste Proportion für x liefert. Eben so ist es, wenn man noch mehrere Versuche mit dem ersten combinirt. Die Stromstärken verhalten sich also, dem Ohm'schen Gesetze gemäß, wirklich wie die Längen der zu durchlaufenden Ketten.

Pouillet ist durch eine Reihe derartiger Versuche im Wesentlichen zu denselben Resultaten gelangt, welche Ohm auf einem anderen Wege herausgestellt hat. Dasselbe Gesetz läßt sich auch für eine zusammengesetzte Kette auf die vorige Weise bestätigen, nachdem zuvor der Widerstand jedes einzelnen Elementes bestimmt worden ist. Es zeigt sich auch hier, daß durch Vermehrung der Elemente die Strom-

Digitized by Google

stärke nur dann vergrößert wird, wenn im Schließungsbogen ein bedeutender Widerstand zu überwinden ist.

Um nachzuweisen, daß die Stromstärke dem Querschnitte der Drähte proportional ist oder, was dasselbe ist, daß der Leitungswiderstand im umgekehrten Verhältniß mit diesem Querschnitte steht, braucht man nur gleich lange, aber ungleich dicke Drähte einzuschalten und die Ablenkungen an der Tangentenbouſſole zu beobachten.

Auch das Verhältniß der Leitungsfähigkeiten verschiedener Metalle ergiebt sich, wenn man nach einander Drähte von diesen Metallen einschaltet und die entsprechenden Ablenkungen beobachtet. Im Folgenden sind die Leitungsfähigkeiten verschiedener Metalle durch Zahlen ausgedrückt.

	Pouillet.	Rieß.	Lenz.	Becquerel.
Silber . . .	136	148	136	74
Gold	103	88,87	80	94
Kupfer . . .	100	100	100	100
Zink	—	—	—	28
Platin . . .	22	15	14	16,4
Eisen	17	17	18	15,8
Queckſilber .	2,6	—	—	3,4

Ein Silberdraht von 136 Fuß Länge setzt also einem elektrischen Strome keinen größeren Widerstand entgegen als ein Eisendraht von 17 Fuß Länge.

Becquerel befestigte bei seinen Versuchen an einen Multiplicator zwei ganz gleiche Drähte und ließ dann gleich starke Ströme in entgegengesetzten Richtungen hindurchgehen, so daß keine Ablenkung der Nadel erfolgen konnte. Die Gleichheit dieser Ströme wurde dadurch hergestellt, daß er die Gefäße, in welche die Drähte des Multiplicators tauchten, durch verschiedene Metalldrähte mit den Polen des Volta'schen Apparates verband und den einen Leitungsdraht so lange verkürzte, bis die Magnetnadel nicht mehr abwich. Rieß benutzte die Erwärmung eines bestimmten, in den Schließungsbogen eingeschalteten Platindrahtes, welche mit der Dauer der Entladung im umgekehrten Verhältniß steht. Der Draht befand sich in einem Luftthermometer.

Uebrigens hat Pouillet darauf aufmerksam gemacht, daß das Resultat dieser Versuche sehr von der Reinheit der Metalle abhängt, und daraus erklärt sich mit Rücksicht auf die Verschiedenheit der angewandten Methoden das Abweichende der obigen Zahlen.

Um die Leitungsfähigkeit der Flüssigkeiten zu bestimmen, wendet

Digitized by Google

man ein System von zwei vollkommen cylindrischen, neben einander liegenden Röhren an, welche gleiche Dimensionen haben und mit der betreffenden Flüssigkeit gefüllt werden. Durch diese Röhren und die Boussole leitet man den Strom und beobachtet die Ablenkung. Man kann nun den Strom zunächst durch eine Röhre und dann durch beide Röhren zugleich gehen lassen. Nimmt man den Querschnitt und die Länge von einer dieser Röhren als Einheit an, so durchläuft der Strom im zweiten Falle eine flüssige Säule von der Länge 1 und dem Querschnitte 2. Läßt man aber den Strom erst durch die eine und dann durch die andere Röhre gehen, so durchläuft er eine Flüssigkeitssäule von der Länge 2 und dem Querschnitte 1. Aus der Vergleichung der Ablenkungen in diesen drei Fällen ergiebt sich, daß der Leitungswiderstand für Flüssigkeiten ebenso wie für Metalle im directen Verhältniß mit der Länge und im umgekehrten mit dem Querschnitte steht.

Bei diesen Versuchen ist es wichtig, daß die Flüssigkeit stets mit demselben Metalle und zwar mit einem solchen in Berührung gebracht werde, welches nicht von der Flüssigkeit angegriffen wird.

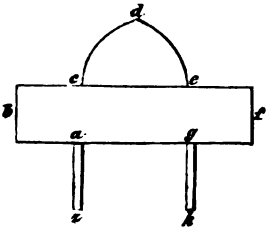
Will man die Leitungsfähigkeiten der Flüssigkeiten unter einander vergleichen, so läßt man den Strom zunächst durch eine cylindrische Röhre, welche mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist, und die Boussole gehen, um die Ablenkung zu beobachten. Diejenige Flüssigkeit, mit deren Leitungsfähigkeit man die der anderen vergleichen will, füllt man in eine verticale cylindrische Röhre, in welche sich von oben ein Kupferdraht mehr oder weniger tief hinabschieben läßt. Die Röhre sei mit einer Kupfervitriollösung angefüllt. Durch diese und die Boussole leitet man dann den elektrischen Strom und drückt hierauf den erwähnten Kupferdraht so weit hinab, bis dieselbe Ablenkung der Nadel wie bei der vorigen Flüssigkeit eintritt. Aus einer Vergleichung der Länge und des Querschnittes der beiden vom Elektricum durchströmten Flüssigkeitssäulen ergiebt sich das Verhältniß der Leitungsfähigkeiten. Nach Pfaff's und Förstemann's Versuchen haben die Säuren im Allgemeinen eine größere Leitungsfähigkeit als Auflösungen von Alkalien und neutralen Salzen.

Pouillet ließ den Strom einer Kette durch eine mit einer gesättigten Kupfervitriollösung gefüllte Röhre von 1 Meter Länge und 20 Millimeter Durchmesser gehen und fand denselben Ausschlag der Nadel, als wenn dieser Strom durch einen 132 Meter langen und 0,144 Millimeter dicken Platindraht geleitet wurde. Hiernach ist das Leitungsvermögen des Platins über 2500000 Mal größer als das einer gesättigten Kupfervitriollösung. Ueberhaupt sind die Metalle bei

Digitized by Google

Weitem bessere Leiter als die Flüssigkeiten. Das Leitungsvermögen der ersteren nimmt mit der Wärme ab, während das einiger anderer Körper dadurch erhöht wird.

214. Im §. 205 Seite 603 fg. haben wir den Fall betrachtet, wo sich ein Strom in mehrere Zweige vertheilt. Das dort Entwickelte bietet uns unter Anwendung des Galvanometers ein bequemes Mittel dar, um die Stromstärke verschiedener Ketten mit einander zu vergleichen. Die elektromotorische Kraft einer Kette sei E, der Widerstand oder die reducirte Länge der Kette nebst den Theilen abc und gfe des Schließungsdrahtes L, die reducirte Länge der Arme cde und ce gleich λ. Dann ist nach dem Ohm'schen Gesetze die Stromstärke in der ungetheilten Kette $s = \frac{E}{L+\lambda}$.



Es ist aber auch $\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda'} + \frac{1}{\lambda''}$, wenn λ' die reducirte Länge von cde und λ'' die von ce bezeichnet; daher

$$s = \frac{E(\lambda' + \lambda'')}{L(\lambda' + \lambda'') + \lambda'\lambda''} \quad 1).$$

Die Stromstärke in dem Seitendrahte ist nach dem angeführten §. $s' = \frac{\lambda'' s}{\lambda' + \lambda''}$ oder, wenn man für s den vorhergehenden Werth setzt,

$$s' = \frac{E\lambda''}{L(\lambda' + \lambda'') + \lambda'\lambda''} \quad 2)$$

Schaltet man nun für cde das aus einem sehr langen und feinen Draht bestehende Gewinde eines Galvanometers ein, während man an die Stelle von ce einen kurzen, dicken Draht bringt, so ist λ'' gegen λ' sehr klein und man hat $s' = \frac{E\lambda''}{L\lambda' + \lambda'\lambda''}$. Wendet man eine zusammengesetzte Kette an, so ist ihr Widerstand L sehr groß gegen λ'' und man hat daher in diesem Fall $s' = \frac{E\lambda''}{L\lambda'}$.

Die Stromstärke in dem Galvanometerdraht steht also im directen Verhältnisse mit dem Quotienten $\frac{E}{L}$ und der Größe λ''. Wenn man nun dem Zwischenstücke λ'' verschiedene Längen giebt, so kann man es leicht dahin bringen, daß die Ablenkung im Galvanometer für eine zweite Kette eben so groß wird, wie für die erste. Bezeichnet man diese Länge durch x und die entsprechende Stromstärke durch

Digitized by Google

$\frac{E'}{L'}$, so hat man nach dem so eben Bemerkten $\frac{E}{L} \cdot \frac{\lambda''}{\lambda'} = \frac{E'}{L'} \cdot \frac{x}{\lambda'}$ oder $\frac{E}{L} : \frac{E'}{L'} = x : \lambda''$. Die Stromstärken zweier Ketten verhalten sich also bei gleicher Ablenkung der Magnetnadel umgekehrt wie die eingeschalteten Längen von ce.

Poggendorff hat eine interessante Anwendung vom Ohm'schen Gesetze gemacht, um das Verhältniß der Stromstärken zweier Ketten zu bestimmen. Man habe zwei Volta'schen Ketten zk und z'k', welche durch einen gemeinschaftlichen Schließungsdraht ab mit einander verbunden sind. Die elektromotorischen Kräfte dieser Ketten seien E und E', ihre reducirten Längen mit Inbegriff der bis zu a und b gehenden Poldrähte L und L', die reducirte Länge des Schließungsdrahtes ab aber L''. Ferner bezeichne man die Stromstärken, welche in zk, z'k' und ab vorhanden sein würden, wenn zk allein thätig wäre, durch s, s', s'', dieselben Stromstärken, wenn z'k' allein wirksam wäre, durch s_1, s_1', s_1'', dagegen die bei der gleichzeitigen Thätigkeit beider Ketten stattfindenden Stromstärken durch S, S', S''. Bewegen sich nun die Ströme der Ketten in demselben Sinne, indem die gleichnamigen Pole der beiden Ketten so mit dem Drahte ab verbunden sind, wie die Figur andeutet, so hat man $S = s - s_1$, $S' = s_1' - s'$, $S'' = s'' + s_1''$. Berücksichtigt man die oben entwickelten Gleichungen 1 und 2, so ist weiter $s = \frac{E(L'+L'')}{L'(L+L'')+LL''}$, $s' = \frac{EL''}{L'(L+L'')+LL''}$, $s'' = \frac{EL'}{L'(L+L'')+LL''}$ oder wenn man der Kürze wegen $L'(L+L'')+LL'' = \Sigma$ setzt,

$$s = \frac{E(L'+L'')}{\Sigma}, \quad s' = \frac{EL''}{\Sigma}, \quad s'' = \frac{EL'}{\Sigma}.$$

Auf ähnliche Weise ist

$$s_1' = \frac{E'(L+L'')}{\Sigma}, \quad s_1 = \frac{E'L''}{\Sigma}, \quad s_1'' = \frac{E'L}{\Sigma}.$$

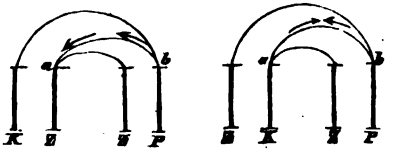
Demnach ist auch

$$S = \frac{EL'(L+L'')-E'L''}{\Sigma}, \quad S' = \frac{E'(L+L'')-EL''}{\Sigma}, \quad S'' = \frac{EL'+E'L}{\Sigma}.$$

Die folgenden Figuren deuten die Combination einer Zinkkupferkette mit einer Zinkplatinkette an, und zwar die erste eine gleichnamige Verbindung, wie wir sie so eben betrachtet haben, die zweite eine

Digitized by Google

ungleichnamige Verbindung. Der Draht a b entspricht dem Schließungsdrahte a b in der obigen Figur. Die vorhergehenden Formeln gelten auch für den zweiten Fall, nur ist E', die elektromotorische Kraft der zweiten Kette, mit entgegengesetztem Zeichen zu nehmen. Werden nun die in dem Drahte a b stattfindenden Stromstärken mit Hülfe eines Galvanometers gemessen, so ist mit Beachtung des Vorhergehenden im ersten Falle $S'' = \frac{E L' + E' L}{\Sigma}$, im zweiten, $S_1'' = \frac{E L' - E' L}{\Sigma}$.



Durch die Addition und Subtraction dieser beiden Ausdrücke ergiebt sich $S'' + S_1'' = \frac{2 E L'}{\Sigma}$, $S'' - S_1'' = \frac{2 E' L}{\Sigma}$.

Wir haben also $S'' + S_1'' : S'' - S_1'' = E L' : E' L = \frac{E}{L} : \frac{E'}{L'}$ für das Verhältniß der Stromstärken der beiden galvanischen Ketten.

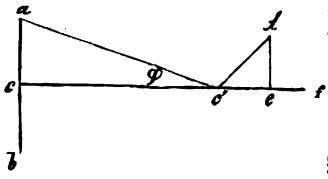
Ist das Verhältniß der reducirten Längen von L'' und L der Art, daß die Stromstärke S' der einen Kette verschwindend klein wird, was vermittelst des eingeschalteten Galvanometerdrahtes leicht bewerkstelligt werden kann, so ist, wie man durch einen Blick auf den obigen Ausdruck von S' sogleich erkennt, $E' (L + L'') = E L''$ und daher, wenn man diesen Werth von E L'' in die Gleichung $S = \frac{E (L' + L'') - E' L''}{\Sigma}$ setzt, $S = \frac{E L' + E' L}{\Sigma} = S''$.

Da nun auch $E' = \frac{E L''}{L + L''}$ ist, so hat man, falls dieser Werth von E' in die vorhergehende Gleichung gebracht wird, $S'' = \frac{E}{\Sigma} \cdot \frac{L L' + L' L'' + L'' L}{L + L''} = \frac{E}{L + L''}$. Es ist also auch $E' = S'' L''$.

Der letzte Ausdruck zeigt, wie man die elektromotorische Kraft einer beliebigen Kette bestimmen kann, wenn man sie mit einer anderen (constanten) Kette combinirt.

215. Ein von Elektricität durchströmter Metallring befinde sich in der Ebene des magnetischen Meridians dergestalt, daß eine von seinem Mittelpunkte c ausgehende senkrechte Linie die Mitte c' einer kleinen Magnetnadel trifft. Ein elementares Stromtheilchen in a sucht dann

Digitized by Google



den einen Magnetpol nach der Richtung c'd zu bewegen. Die magnetische Kraft c'd des Stromes zerfällt aber in die beiden Seitenkräfte c'e und ed, wo die erstere nach der Richtung der Linie cf, die letztere senkrecht darauf wirkt. Die Seitenkraft $c'e = c'd \sin \varphi$ ist es nun eigentlich, welche den Pol der Nadel beschleunigt und die letztere parallel mit der Axe cf zu stellen sucht. Das Stromtheilchen selbst läßt sich durch a. dx ausdrücken, wenn man durch a den Halbmesser ca des Ringes und durch dx die Länge des betreffenden Stromtheilchens bezeichnet. Nennt man nun die Stromstärke g, das magnetische Moment der Nadel m und die Entfernung c'a der letzteren vom Stromtheilchen r, so kann man die mit cf parallel wirkende Kraft des Stromelements durch die Formel $\frac{m\,g\,a\,dx}{r^2} \cdot \frac{a}{r}$ ausdrücken, wenn man berücksichtigt, daß $\sin \varphi = \frac{a}{r}$ ist. Um aber die Wirkung des ganzen Kreisstromes zu erhalten, muß man, wie ohne Weiteres einleuchtet, an die Stelle von dx die Peripherie 2π setzen. Man bekommt dann $\frac{2\pi a^2 g m}{r^3}$.

Hieraus folgt also, daß die Wirkung eines Kreisstromes auf eine entfernte, kleine Magnetnadel der dritten Potenz ihrer Entfernung von der Kreisperipherie proportional ist.

Bezeichnet man den Ablenkungswinkel der Nadel durch v, so ist auch $\frac{2\pi a^2 g m}{r^3} \cos v = m\,T \sin v$, wo der Ausdruck auf der rechten Seite des Gleichheitszeichens bekanntlich die Kraft angiebt, womit der Erdmagnetismus die Nadel in den magnetischen Meridian zurückzuführen sucht. Aus dieser Gleichung folgt $\operatorname{tang} v = \frac{2\pi a^2 g}{r^3 T}$.

Befindet sich die Nadel in der Mitte des Ringes selbst, so ist $a = r$ und man hat $\operatorname{tang} v = \frac{2\pi g}{rT}$.

Hieraus ergiebt sich $g = \frac{r\,T \operatorname{tang} v}{2\pi}$, eine Formel, welche geeignet ist, um die Stromstärke g in absolutem Maße auszudrücken, wenn der Halbmesser des Ringes und die Intensität des Erdmagnetismus am Beobachtungsorte bekannt ist.

Digitized by Google

Fünftes Kapitel.

Vom Elektromagnetismus.

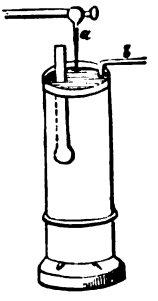
216. Im §. 211 Seite 624 f. haben wir bereits die Gesetze, nach welchen sich die Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom richtet, angegeben. Wir haben auch schon bemerkt, daß die ablenkende Kraft des Stromes eine Function der Entfernung des Schließungsdrahtes von der Nadel ist, d. h. daß sie um so stärker ist, je weniger die genannte Entfernung beträgt. Biot und Savart bestimmten das Wirkungsgesetz dieser Kraft dadurch, daß sie eine an einem Seidenfaden aufgehängte Magnetnadel in verschiedenen Entfernungen vom elektrischen Strome schwingen ließen. Die diesen Entfernungen entsprechende Kraft des Stromes ergab sich aus dem bekannten Pendelgesetze, nach welchem sich die bewegenden Kräfte wie die Quadrate der Schwingungszahlen verhalten. Diese Versuche führten zu dem Resultate, daß die ablenkende Kraft, welche ein langer, gerader Schließungsdraht auf einen Magnetpol ausübt, dem Abstande des letzteren vom Drahte proportional ist. Bestimmt man aber mit Hülfe der Rechnung die Wirkung eines Stromelementes auf einen Magnetpol, so findet sich auch hier das allgemeine Gesetz, daß die Wirkung im umgekehrten Verhältniß mit dem Quadrate der Entfernung steht.

Die ablenkende Kraft des elektrischen Stromes oder vielmehr eines Stromtheilchens wirkt merkwürdiger Weise nicht, wie gewöhnlich, längs der geraden Linie, welche das Stromtheilchen mit dem magnetischen verbindet, sondern senkrecht dagegen oder senkrecht gegen die Ebene, welche durch das magnetische Theilchen und das Stromtheilchen bestimmt ist. Außerdem ändert sich diese Kraft noch mit der Richtung des Stromtheilchens in der genannten Ebene, so daß sie im directen Verhältniß mit dem Sinus des Winkels steht, den die Richtung des Stromtheilchens mit der zu dem magnetischen Theilchen gehenden Geraden macht.

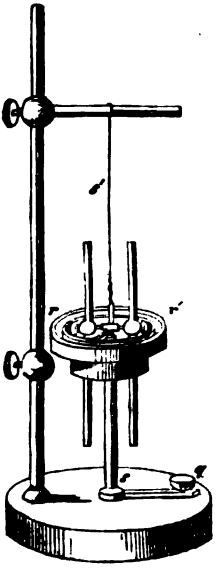
217. Daß die ablenkende Kraft des Stromes nicht längs der Verbindungslinie des Stromtheilchens und des Magnetpols wirkt, geht ganz einfach aus der Art und Weise hervor, wie die Ablenkung der Nadel erfolgt. Bei einem horizontal von Nord nach Süd gehenden Strom wird der Nordpol der Nadel, wenn sie über dem Drahte steht, nach Ost, wenn sie auf der Ostseite steht, abwärts, wenn sie unter dem Drahte steht, nach West, wenn sie auf der Westseite

Digitized by Google

des Drahtes steht, aufwärts getrieben, also jedesmal senkrecht gegen die Verbindungslinie des Poles und des entsprechenden Stromtheilchens abgelenkt. Hiernach hat der Nordpol ein Bestreben, von der Rechten gegen die Linke um den Strom zu rotiren, während beim Südpole sich dieses Bestreben im entgegengesetzten Sinne kundgiebt. Um nun eine solche Drehung wirklich hervorzubringen, kommt es nur, wie leicht einzusehen, darauf an, daß man den Magneten hinreichend beweglich macht und den elektrischen Strom blos auf einen Pol wirken läßt. Nach Faraday kann man diese Erscheinung auf folgende Weise darstellen. Ein Glasgefäß, dessen inneren Rand ein metallener Ring umgiebt, ist bis zu dem letzteren mit Quecksilber gefüllt. Durch einen verticalen Draht a geht der elektrische Strom zur Mitte der Quecksilberfläche, von wo er sich rings nach dem Rande verbreitet, um von diesem vermittelst des Drahtes b nach dem anderen Pole einer Kette zu gehen. Im Quecksilber sieht man einen Magnetstab, welcher durch eine unten angebrachte Platinmasse in verticaler Stellung schwimmend erhalten wird. Ist nun der außerhalb des Quecksilbers befindliche Pol der nördliche, so geschieht die Rotation von der Rechten gegen die Linke, ist dagegen der Südpol oben oder geht der Strom vom Rande nach der Mitte der Quecksilberfläche und von da durch den verticalen Draht aufwärts, so rotirt der Magnet im entgegengesetzten Sinne, also von der Linken gegen die Rechte.



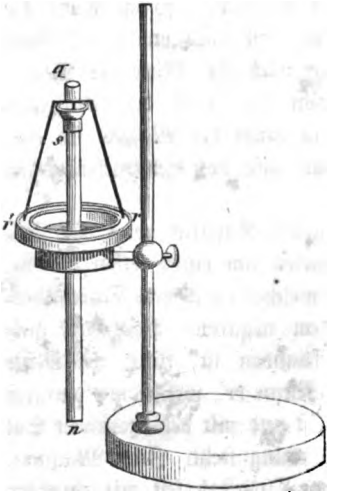
Auch der folgende Apparat zeigt die Rotation eines Magneten um einen festen Strom. Ein Kupferstab s, welcher durch das Quecksilbernäpfchen q mit dem negativen Pol einer galvanischen Kette verbunden ist, führt zur Mitte einer kreisförmigen Rinne rr', welche mit einigem Quecksilber gefüllt ist und mit dem positiven Pol der Kette in Verbindung steht. Zwei Magnete, welche durch einen Querstab fest mit einander verbunden und deren Nord- oder Südpole nach oben gekehrt sind, hängen an einem Seidenfaden s'. Der Querstab ist in seiner Mitte mit einem Metallstifte versehen, dessen Spitze in eine mit Quecksilber gefüllte Vertiefung des Stabes s



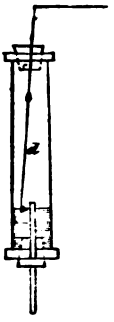
Digitized by Google

taucht. Von der Mitte des Querſtabes geht ſenkrecht zu ſeiner Richtung ein horizontales Leitungsſtäbchen aus, das mit ſeiner etwas gekrümmten Spitze das Queckſilber in der Rinne berührt. Der Strom geht nun entweder vom Näpfchen q durch den Stab s und das oben erwähnte Stäbchen in das Queckſilber der Rinne, um von hier durch einen Draht zu dem anderen Pol der Kette zu gelangen, oder im umgekehrten Sinne. Sobald der Strom im Gange iſt, erfolgt auch eine Drehung der Magnete um den Leitungsſtab s in der einen oder anderen Richtung.

Dieſelben Kräfte, welche den Magneten um den Strom bewegen, werden auch umgekehrt im Stande ſein, einen beweglichen Leitungsdraht um einen feſten Magneten rotiren zu machen. Um dies durch den Verſuch zu zeigen, befeſtigt man an der höheren, kreisförmigen Rinne rr′ einen Cylinder von Holz oder Kork, durch welchen ein Magnetſtab ns hindurchgeht. An dem oberen Ende des letzteren iſt ein Stahlnäpfchen aufgeſchraubt, in dem ſich eine feine Metallſpitze befindet, welche mit einem Kupferbügel, deſſen Enden in die Queckſilberrinne tauchen, in Verbindung ſteht. Ein zweites Näpfchen q iſt, wie die Rinne, mit Queckſilber gefüllt, um den einen Poldraht der galvaniſchen Kette mit dem Kupferbügel in leitende Berührung bringen zu können, während der andere Poldraht in das Queckſilber der Rinne taucht. Sobald der elektriſche Strom die beiden Arme des Bügels durchläuft, beginnen ſie um den Magneten zu rotiren. Iſt das Südende des letzteren nach oben gerichtet und geht der Strom im Bügel aufwärts, ſo rotirt dieſer, vom Magneten aus betrachtet, von der Rechten gegen die Linke, wie die Zeiger einer Uhr. Werden die Poldrähte gegen einander vertauſcht, ſo daß der Strom in den Armen des Bügels abwärts geht, oder kehrt man das Nordende des Magneten nach oben, während die Richtung des Stromes die vorige bleibt, ſo geſchieht die Rotation von der Linken gegen die Rechte. — Uebrigens kann man ſich zu dieſem Verſuche auch eines mit Queckſilber gefüllten Gefäßes bedienen, in welches die Spitze eines beweglichen Drahtes

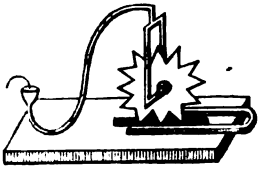


Digitized by Google



d taucht, während in der Mitte des Gefäßes ein Magnetstab vertical befestigt ist. Der elektrische Strom geht hier durch den Draht in's Quecksilber oder umgekehrt aus diesem in jenen, wobei der bewegliche Draht in dem einen oder anderen Sinne um den Pol des Magneten rotirt.

Auf dem Vorstehenden beruht das Barlow'sche Rädchen. An einem gabelförmig ausgeschnittenen Poldrahte ist nämlich ein sternförmiges Rädchen befestigt, dessen Spitzen in ein Gefäß mit Quecksilber herabreichen. Bringt man nun dieses Rädchen in die Richtung des magnetischen Meridians und leitet dann einen elektrischen Strom durch das System, so erfolgt eine äußerst schnelle Drehung des Rädchens, wenn zu beiden Seiten des letzteren die Pole eines Hufeisenmagneten liegen. Durch eine Umkehrung der Stromrichtung oder durch einen Wechsel der Pole wird auch die Bewegung des Rädchens umgekehrt. Geht der Strom aus dem Quecksilber des Gefäßes durch die Radspeichen aufwärts, so bewegt sich der untere Theil des Rädchens, vom Nordpol des Magneten aus betrachtet, gegen die Rechte. Wenn dagegen der Strom durch die Speichen abwärts in das Quecksilber des Gefäßes geht, so geschieht die Bewegung, von demselben Pole aus gesehen, im entgegengesetzten Sinne. —

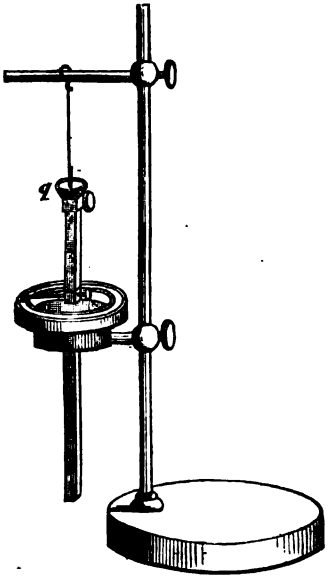


Auch in flüssigen Leitern läßt sich eine elektromagnetische Rotation hervorbringen. Nach Schweigger geschieht dies am einfachsten, wenn man auf den einen Pol eines starken Magneten ein Uhrglas mit Salpetersäure und Salzsäure setzt und in diese Flüssigkeit zwei Drähte aus Silber und Zink taucht. Werden die Drähte an ihren oberen Enden mit einander in Berührung gebracht, so entstehen mit dem elektrischen Strome dieser einfachen Kette sogleich zwei Wirbel um die Drähte. Die Richtung dieser Bewegung geht in die entgegengesetzte über, wenn man das Schälchen auf den anderen Pol des Magneten setzt. Nach Fechner bedient man sich zu eben dem Behufe folgenden Verfahrens. Eine Kupferschale, deren Boden in der Mitte etwas aufwärts gedrückt ist, wird auf den Pol eines vertical stehenden Magneten gestellt. Auf den in die Höhe gedrückten Theil der Kupferschale legt man nun einen Zinkring und schließt die so gebildete einfache Kette durch eine Salmiaklösung, welche mit

Digitized by Google

etwas Salzsäure gemischt ist. Sobald der elektrische Strom durch diese Flüssigkeit geht, geräth sie in eine Rotation, welche besonders am Zinkringe sehr lebhaft ist, so daß selbst hineingelegte Papierschnitzel mitfortgerissen werden. —

Wenn man einen elektrischen Strom durch einen um eine verticale Are drehbaren Magneten dergestalt leitet, daß er ihn von dem einen Pole an bis zur Mitte durchfließt und dann seitwärts von ihm hinweggeht, so wird der Magnet in eine Rotation um seine eigne Are versetzt. Die Figur zeigt, wie sich diese Erscheinung durch den Versuch darstellen läßt. Der Magnetstab geht durch die Mitte der Rinne und hängt an einem Seidenfaden, dessen unteres Ende in der Mitte eines Quecksilbernäpfchens befestigt ist, welches von einer oben am Magnetstabe angeschraubten Hülse getragen wird. Von der Mitte des Stabes geht ein leitender Draht in die Quecksilberrinne. Der Strom geht nun entweder aus der letzteren durch den horizontalen Draht und die obere Hälfte des Magneten nach dem Quecksilbernäpfchen q, um von hier nach dem anderen Pole der Kette zu gehen, oder den umgekehrten Weg. Wenn der Südpol oben ist und der Strom aufwärts geht, so geschieht die Rotation von der Rechten gegen die Linke, hat aber der Strom die entgegengesetzte Richtung oder befindet sich bei der vorigen Richtung des Stromes der Nordpol oben, so rotirt der Magnetstab im entgegengesetzten Sinne.

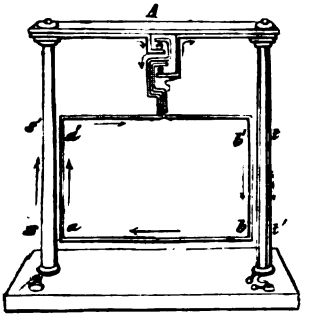


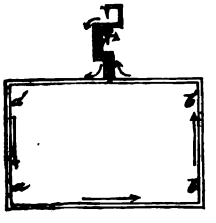
218. Ein continuirlicher, elektrischer Strom wirkt nicht nur auf die Magnetnadel, sondern auch auf einen anderen Strom nach bestimmten Gesetzen ein. Ueber diese gegenseitige Einwirkung elektrischer Ströme hat Ampère eine Reihe wichtiger Wahrheiten entdeckt.

Zwei parallele, elektrische Ströme ziehen einander an, wenn sie sich in derselben Richtung bewegen, sie stoßen sich ab, wenn sie entgegengesetzte Bewegungsrichtungen haben. Um diesen Satz durch den Versuch zu bestätigen, dient nachstehender Apparat. Auf einem Brette sind zwei messingene Säulen aufgeschraubt, welche durch Kup-

Digitized by Google

ferdrähte mit zwei Queckſilbernäpfchen in Verbindung ſtehen. In den letzteren hängt vermittelſt ſeiner Metallſpitzen ein Rechteck von Kupferdraht. Der elektriſche Strom ſteigt nun durch die Säule ss′ auf, geht dann durch das Rechteck in der Richtung der Pfeile und ſteigt die Säule tt′ herab nach dem negativen Pole der Kette. Man ſieht, daß der Strom in ss′ und aa′, wie auch in tt′ und bb′ gleiche Richtung hat. So oft man nun das Rechteck aus der in der Figur bezeichneten Lage herausdreht, eben ſo oft kehrt es wieder in dieſelbe zurück, was nur daher kommt, daß aa′ von ss′ und bb′ von tt′ angezogen wird. Bringt man aber an die Stelle des in der Figur befindlichen Rechtecks das nachſtehende, ſo haben die Ströme in aa′ und ss′, in bb′ und tt′ entgegengeſetzte Richtungen, es erfolgt eine Abſtoßung. Auf der gegenſeitigen Anziehung paralleler, gleichlaufender Ströme beruht folgender Verſuch von Roget. Man hängt eine ſchlaffe Spirale von biegſamem Drahte ſenkrecht auf und verbindet ihr oberes Ende mit dem einen Pole einer galvaniſchen Kette, während man das untere Drahtende in ein Queckſilbergefäß tauchen läßt, welches mit dem zweiten Pole der Kette in Verbindung ſteht. Die einzelnen Ringe der Spirale ziehen ſich nun unter einander an, weil ſie von elektriſchen Strömen in derſelben Richtung durchlaufen werden. In Folge dieſer Anziehung verkürzt ſich die Spirale und ihr unteres Ende tritt aus dem Queckſilber heraus. Hiermit iſt aber der Strom unterbrochen, die Anziehung fällt weg und die Spirale nimmt wieder ihre gewöhnliche Lage an. Da aber hierdurch die untere Drahtſpitze wieder in's Queckſilber kommt, ſo erfolgt eine neue Anziehung der einzelnen Windungen der Spirale und eine abermalige Verkürzung der letzteren, u. ſ. f. Zwei geradlinige Ströme, welche einen Winkel mit einander bilden, ziehen ſich an, wenn beide nach dem Scheitelpunkte hin oder davon weggehen; haben ſie aber entgegengeſetzte Richtungen, dergeſtalt, daß der eine ſich nach dem Scheitelpunkte hinbewegt, während der andere von ihm weggeht, ſo findet zwiſchen ihnen eine Abſtoßung ſtatt. Liegen die beiden Ströme nicht in derſelben

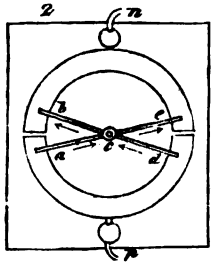




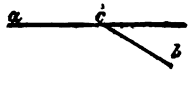
Digitized by Google

Ebene, so ist unter dem Scheitel der Punkt zu verstehen, welcher in der kürzesten Entfernung beider Ströme liegt.

Wenn zwei geradlinige Ströme sich durchkreuzen, so streben sie so lange sich parallel zu stellen, bis sie nach einerlei Richtung gehen und parallel sind. Denn die Theile a und c, in welchen der Strom nach dem Kreuzungspunkte geht, ziehen sich an, eben so auch die Theile b und d, in denen der Strom von dem genannten Punkte hinweggeht. Dagegen stoßen die Theile a und d, wie auch die Theile c und b einander ab, weil in dem einen Theile der Strom nach dem Kreuzungspunkte hin, in dem anderen aber von diesem weggeht. Um die vorstehenden Sätze durch den Versuch nachzuweisen, bedient man sich am bequemsten einer Platte von Holz, welche zwei halbkreisförmige Rinnen, die durch zwei Scheidewände von einander getrennt sind, enthält. Im Mittelpunkte dieser Rinnen ist (Fig. 1.) eine Spitze befestigt, auf welcher eine sehr bewegliche Kupfernadel ruht, die mit ihren aus Eisen bestehenden Enden in das Queckſilber der Rinne taucht. Unterhalb dieser Nadel ist eine zweite angebracht, die sich mit der Hand verschieben läßt und deren Enden gleichfalls in das Queckſilber eintauchen. Man sieht nun aus Fig. 2 leicht, wie der Strom sich von p aus in die eine Rinne verbreitet und dann durch die Nadeln in die andere Rinne geht, aus der er bei n austritt. Bei der in der Figur angegebenen Stellung der beiden Nadeln haben die Ströme in den einzelnen Armen die Richtung der Pfeile. In diesem Falle beobachtet man eine Abstoßung zwischen den Armen der Nadeln. Giebt man aber den Nadeln eine solche Stellung, daß der Winkel acd kleiner als ein rechter ist, so gewahrt man eine Anziehung.

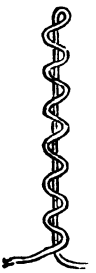


Laut des Vorhergehenden müssen die Theile ac und cb desselben Stromes sich abstoßen, weil der Strom in ac zu dem Scheitelpunkte c hingeht, während er in cb von demselben weggeht. Hieraus folgt, daß die verschiedenen Theilchen eines geradlinigen Stromes einander abstoßen, da man die Verlängerung von ac als den zweiten Schenkel eines Winkels



Digitized by Google

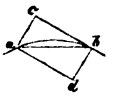
von 180° betrachten kann. Ampère suchte diesen Satz durch folgenden Versuch zu beweisen. Ein mit Quecksilber gefülltes Gefäß ist durch eine nichtleitende Scheidewand in zwei Fächer getheilt. Ein bis an die Enden mit Seide übersponnener Kupferdraht ist dergestalt umgebogen, daß er zwei parallele Arme bildet, die auf das Quecksilber der Fächer, parallel mit der Scheidewand, gelegt werden. Verbindet man nun mit den Drähten, welche in der Verlängerung jener Arme in die erwähnten Fächer hineinragen, die Pole einer galvanischen Kette, so weicht der bewegliche Draht von den Poldrähten zurück gegen das andere Ende des Gefäßes hin. Daß die Elemente des Elektricums, welche den Strom bilden, abstoßend auf einander wirken, wissen wir aus dem Früheren, und die Ausbreitung des Elektricums längs eines Leitungsdrahts ist größtentheils nur die Folge davon, daß die elektrische Repulsion oder Spannung auf der einen Seite ein merkliches Uebergewicht hat. Wir haben auch schon früher bemerkt, daß die Elemente des E in Repulsion wider sich selbst gerathen müssen, wenn sie aus einer Flüssigkeit von allen Seiten her in einen Leitungsdraht einzudringen suchen. Schon dies kann zu einer Abstoßung des beweglichen Drahtes auf dem Quecksilber Veranlassung geben, so daß jene Erscheinung mit Wahrscheinlichkeit aus der repulsiven Wirkung, welche die Elemente des E gegen einander ausüben, erklärt werden kann. Der Versuch giebt aber hinsichtlich des zu Anfang ausgesprochenen Satzes insofern kein entscheidendes Resultat, als die elektrische Repulsion nicht einerlei ist mit der Kraft, welche die Ablenkung der Magnetnadel und die gegenseitige Anziehung und Abstoßung der Leitungsdrähte hervorbringt, obschon sie ein mitwirkender Factor sein kann. Jacobi beobachtete, daß die Schließungsdrähte einer sehr starken Kette aus dem Quecksilbernäpfchen, in welche sie tauchten, herausgeworfen wurden, wenn der Strom sein Maximum erreicht hatte. Auch dies kann eine bloße Folge der gewöhnlichen elektrischen Repulsion sein. —



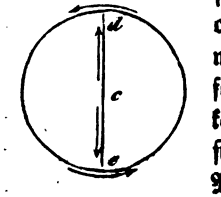
Die Wirkung eines krummlinigen Stromes ist gleich der Wirkung eines geradlinigen, welcher sich von dem einen Endpunkte des ersteren bis zu dem anderen erstreckt. Biegt man einen mit Seide übersponnenen Kupferdraht, wie die Figur zeigt, und läßt man dann einen Strom hindurchgehen, so bringt er auf das Rechteck in Fig. A Seite 641 nicht die geringste Wirkung hervor, welche Richtung auch

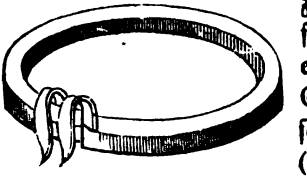
Digitized by Google

der Strom im Rechtecke haben mag. Man bemerkt, daß der Strom sich in beiden Theilen des Drahtes immer in entgegengesetzten Richtungen bewegt; geht er nämlich in dem geraden Theile aufwärts, so geht er in dem krummen abwärts und umgekehrt. Beide Theile haben also gleiche, aber gerade entgegengesetzte Wirkungen. Hiernach kann man die Wirkung des Stromtheiles a b durch die Wirkungen der geraden Stromtheile a c und c b ersetzen oder auch durch die Diagonale des Parallelogrammes a c b d, welche die Sehne des Bogens a b darstellt. Für ein Stromtheilchen von sehr geringer Ausdehnung fällt aber der Bogen mit seiner Sehne zusammen.



Wenn ein parallel mit sich selbst beweglicher Strom c d so gegen einen festen unbegrenzten Strom a b hingeht, daß diesen seine Verlängerung trifft, so wird er nach einem bekannten Gesetze von dem Theile a m des Stromes a b angezogen und von dem Theile b m abgestoßen. Der Strom c d muß also parallel mit sich selbst in einer dem Strom a b entgegengesetzten Richtung fortgehen. Entfernt sich aber der Strom c d von a b, so wird er nach demselben Gesetze umgekehrt von a m abgestoßen und von m b angezogen. In diesem Falle wird er also in der Richtung des Stromes a b selbst fortgetrieben. Ist nun der Draht d e um den Punkt c drehbar und bewegt sich in ihm ein Strom von dem genannten Punkte aus nach den beiden Enden hin, so folgt aus dem Vorstehenden, daß er sich von der Linken gegen die Rechte oder im umgekehrten Sinne um den Punkt c drehen muß, wenn er der Einwirkung eines festen kreisförmigen Stromes ausgesetzt ist. Auch diese Rotation kann man durch den Versuch darstellen. Man bedient sich hierzu eines Gefäßes aus Kupfer, das in der Mitte durchbrochen ist. Durch die Oeffnung geht ein verticaler Metallstab, welcher oben mit einem Quecksilbernäpfchen versehen ist. In dem letzteren befindet sich eine feine Spitze, auf welcher ein horizontaler Draht, der sich in zwei Kugeln endigt, ruht. Das Gefäß ist mit Wasser gefüllt, in das (beiderseits) zwei

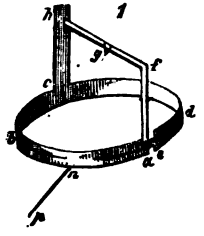


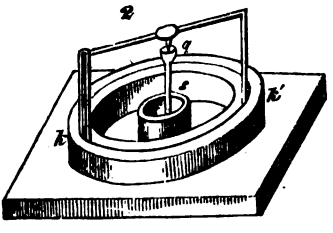


Digitized by Google

kurze verticale Drähte herabreichen. Steigt nun in dem verticalen Stabe ein Strom auf, so verbreitet sich derselbe durch die beiden horizontalen und verticalen Drähte ins Wasser. Hierauf umgiebt man das Gefäß mit dem nebenstehenden Leiter, welcher aus einem mit Seide übersponnenen Kupferstreifen besteht. Leitet man durch diesen einen Strom, so entsteht durch seine Wirkung auf den beweglichen Draht dem Obigen gemäß eine Drehung des letzteren.

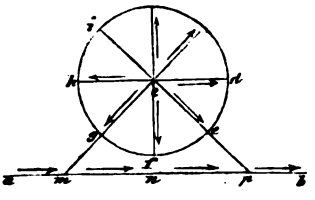
Um derartige Rotationsversuche anzustellen, kann man auch als beweglichen Leiter einen kupfernen Ring a b c d e nehmen, welcher bei a c durch einen Nichtleiter unterbrochen ist und bei a mit dem rechtwinkelig gebogenen Drahte a f g in Verbindung steht. Der Arm g h c ist ein Nichtleiter. Diese Vorrichtung setzt man mittelst der Stahlspitze g in das Quecksilbernäpfchen q (Fig. 2), so daß der Ring a b c d e in das gesäuerte Wasser des cylindrischen Kupfergefäßes k k' taucht. Steigt nun der Strom durch den Stab s auf, so geht er (Fig. 1) durch g f a nach dem Ringe, um ihn in der Richtung a b c d zu durchfließen. Zu gleicher Zeit gehen aber auch Ströme von dem Ringe durch das Wasser nach dem Umfange des kupfernen Gefäßes. Ein jeder von diesen letzteren Strömen, z. B. n p (Fig. 1), entfernt sich nun von dem Strome a b im Ringe. Die Ströme a n und n p stoßen sich daher ab, während sich die Theile n b und n p anziehen. Der Ring muß sich also in der Richtung b a bewegen. Das Wasser müßte sich gleichzeitig in Folge derselben Wirkung in entgegengesetzter Richtung bewegen, wenn es dessen Masse erlaubte. Geht der Strom vom Gefäße nach dem Ringe, also von p nach n, so fließt er in der Richtung n a f g weiter. In diesem Falle wird n a von n p abgestoßen, während der letztere b n anzieht. Die Drehung geschieht also in demselben Sinne wie vorher. Dagegen wird sie eine entgegengesetzte Richtung einschlagen, wenn die Unterbrechung des Ringes links von a oder wenn der leitende Arm a f bei e angebracht wäre.

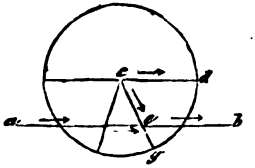


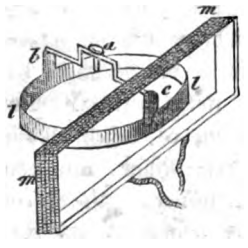


Zufolge des Vorhergehenden muß ein um eine Axe beweglicher Strom c d von einem unbegrenzten geradlinigen Strome a b in eine beständige Drehung versetzt werden, sofern dieser den ersten in keiner

Lage durchschneidet. Hat nämlich der Strom cd dieselbe Richtung wie ab, so wird er von nb angezogen, bis er in die Lage ce kommt, in der er von ap angezogen und von pb abgestoßen wird. Folglich dreht er sich in derselben Richtung weiter. In der Lage cf zieht ihn an an, während ihn nb abstößt. In cg wird er von am angezogen und von mb abgestoßen, in ch wird er von dem entgegengesetzten Strome ba abgestoßen, in ci erfährt er von pb eine Anziehung und von ap eine Abstoßung, u. s. w. Man sieht also klar, daß dieser Strom sich in einer Richtung drehen muß, welche der von ab entgegengesetzt ist. Dagegen würde sie in der Richtung des letzterwähnten Stromes geschehen, wenn der bewegliche Strom statt von c nach d von d nach c ginge. Schneiden sich die beiden Ströme irgendwo, so giebt es für den beweglichen Strom eine Gleichgewichtslage, in welcher das Streben zur Umdrehung aufhört. Denn in der Lage cg wird der Stromtheil ce von ae angezogen, von eb abgestoßen, während der Theil eg von ae abgestoßen und von eb angezogen wird. Man sieht nun ohne Weiteres, daß der bewegliche Strom zur Ruhe kommen muß, sobald die eben angeführten Wirkungen einander gleich sind. Um die beiden eben erörterten Gesetze durch den Versuch zu bestätigen, hängt man den geschlossenen Leiter ll in das Quecksilbernäpfchen des Apparates (Fig. 2 Seite 645) und bringt mit dem Gefäße das eine Ende des Multiplicatordrahtes mm in Verbindung. Alsdann geht der Strom durch die Arme des geschlossenen Leiters und durch das Wasser zu dem Gefäße und von da durch den Multiplicatordraht zu dem anderen Pole der Kette. Die angeführten Erscheinungen zeigen sich, sobald man dem Drahte die entsprechenden Lagen gegen die Arme ab und ac giebt.



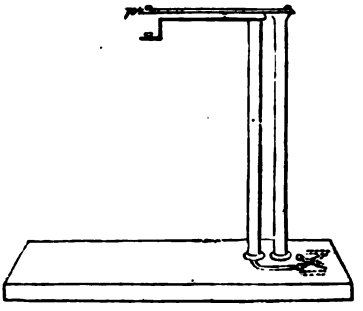


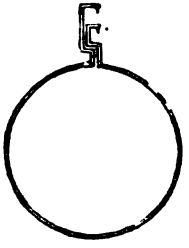


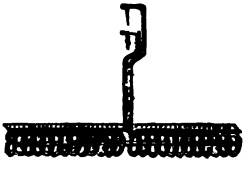
219. Die Wechselwirkung, welche man zwischen der Magnetnadel und einem von Elektricität durchströmten Leitungsdraht beobachtet, führt zur Vermuthung, daß auch der Erdmagnetismus eine bestimmte Wirkung auf einen solchen Draht ausüben müsse. Dies wird durch den Versuch bestätigt, wenn man nur dafür sorgt, den in sich selbst

Digitized by Google

geschlossenen Strom hinreichend beweglich zu machen. Zu diesem Behufe bediente sich Ampère einer Aufhängungsart, welche wir bereits kennen gelernt haben. Auf einem Brette erheben sich zwei Messingsäulen, von denen jede einen horizontalen Arm trägt, der an seinem Ende mit einem Quecksilbernäpfchen versehen ist. Einen kreisförmig gebogenen Schließungsdraht bringt man nun an diesem Gestelle so an, daß die eine Stahlspitze desselben auf den Boden des einen Näpfchens und zwar auf einem daselbst befindlichen Glasplättchen ruht, während die andere Spitze nur in das Quecksilber des zweiten Näpfchens taucht. Setzt man nun die Füße der Säulen mit den Polen einer galvanischen Kette in Verbindung, so steigt der Strom in der einen Säule auf und geht von dem einen Näpfchen durch den kreisförmigen Kupferdraht zum anderen. Nach einigen Schwankungen stellt sich der Kreis so, daß seine Ebene rechtwinkelig zum magnetischen Meridiane ist. Entfernt man ihn aus dieser Lage, so kehrt er stets wieder in dieselbe zurück, so lange er vom Strome durchflossen wird. Hieraus kann man leicht den Schluß ziehen, daß auch ein System paralleler, neben einander stehender Kreise, die von dem Strome in demselben Sinne durchlaufen werden, unter der Einwirkung des Erdmagnetismus dieselbe Lage annehmen muß. Auch dies bestätigt der Versuch, wenn man einen Schraubendraht von der in der Figur angegebenen Form an dem obigen Gestelle aufhängt. Sämmtliche Kreisebenen nehmen eine zum magnetischen Meridiane senkrechte Stellung an, so daß also die Axe des Schraubendrahtes in die Richtung des magnetischen Meridians selbst oder einer Declinationsnadel fällt. Ein solcher Schraubendraht besitzt fast alle Eigenschaften eines Magneten. Man sieht nämlich leicht ein, daß er an dem einen Ende einen Nord-, an dem anderen einen Südpol haben muß. Denn wir wissen, daß ein vom Elektricum durchströmter Schließungsdraht, auf seinen beiden, gerade gegenüberstehenden Seiten die Magnetnadel im





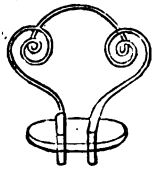


Digitized by Google

entgegengesetzten Sinne ablenkt, daß sie z. B. auf der einen Seite abwärts geht, wenn sie auf der anderen aufwärts getrieben wird. Betrachten wir nun die beiden äußersten Kreise unseres Schraubendrahtes, so ist an dem einen Ende die rechte, an dem anderen die linke nach außen gekehrt. Die beiden Enden müssen also auf eine angenäherte Magnetnadel im entgegengesetzten Sinne ablenkend wirken. Weiter erkennt man hieraus, daß zwei solche Schraubendrähte auf ähnliche Weise aufeinander wirken müssen, wie zwei Magnetstäbe, wenn sie mit den gleichnamigen oder ungleichnamigen Enden einander genähert werden.

Indessen ist ein solcher elektrodynamischer Schraubendraht noch wesentlich von einem eigentlichen Magneten verschieden, insofern nämlich als der erstere in seiner Mitte, der letztere aber an seinen beiden Enden die stärkste Wirkung äußert. Diese Verschiedenheit hat Poggendorff durch einen einfachen Versuch nachgewiesen. Schiebt man nämlich in einen vertical gehaltenen hohlen Magnetstab, der ungefähr 3 Zoll lang, 2½ Linien weit und mit einer dünnen Glasröhre ausgefüttert ist, eine leichte, etwa 9 Linien lange Magnetnadel vorsichtig von oben hinein, so fällt dieselbe nicht hindurch, sondern ragt noch zum Theil freischwebend aus dem Magneten hervor. Drückt man sie tiefer hinab, so steigt sie, sobald der Druck aufhört, in die Höhe, um ihre vorige Stellung wieder einzunehmen. Wird dagegen die Nadel in eine von der Elektricität durchströmte Drahtspirale gebracht, so geht sie sogleich bis zur Mitte, wo sie bei einem hinreichend kräftigen Strome schweben bleibt.

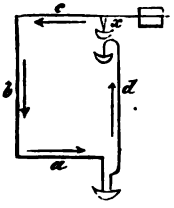
Um die Richtkraft zu zeigen, welche der Erdmagnetismus auf elektrische Ströme ausübt, kann man auch eine Vorrichtung von La Rive benutzen. In eine Korkscheibe ist ein Stück Zink und ein Stück Kupfer befestigt, welche beide durch einen Kupferdraht mit einander verbunden sind, dem man verschiedene Formen geben kann. Setzt man nun die Korkscheibe auf Wasser, welches mit einer Säure vermischt ist, so entsteht bekanntlich ein Strom, der vom Kupfer durch die Flüssigkeit zum Zink und von diesem durch den Draht geht. Sobald nun der Strom circulirt, nimmt diese Vorrichtung eine Stellung an, welche der Einwirkung des Erdmagnetismus entspricht. Man kann auch dem Draht die Form der oben betrachteten Spirale geben, deren Are dann die Richtung der Magnetnadel annimmt.



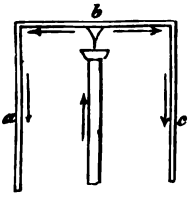
Ein Strom, welcher um eine verticale Axe beweglich ist, wird durch die Einwirkung des Erdmagnetismus nach Ost gerichtet, wenn

Digitized by Google

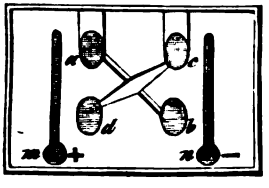
er (nach unserer Bezeichnungsweise) aufsteigend ist, nach West, wenn er niedersteigend ist. Um dies nachzuweisen, hänge man den Leitungsdraht a b c mittelst der Stahlspitze x in das Näpfchen p des Ampère'schen Stativs (Seite 647) und lasse mit Hülfe des verticalen Drahtes d einen Strom hindurchgehen. Alsdann geschieht die Bewegung des Leiters auf die angegebene Weise, indem die Wirkung des Erdmagnetismus auf die horizontalen Ströme als gleich und entgegengesetzt ausfällt.

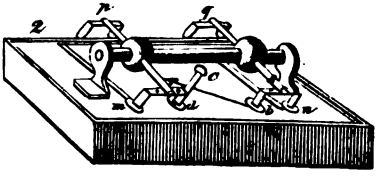


Wenn man den Leiter a b c mit der Spitze in das Quecksilbernäpfchen des Apparates 2 auf Seite 645 hängt, so daß die Enden von a und c in die Flüssigkeit des Gefäßes tauchen, so geräth er, wenn er von einem Strome durchflossen wird, in eine beständige Drehung, welche von Ost nach Süd gerichtet ist, wenn sich der Strom von seiner Axe entfernt, dagegen von Ost nach Nord, wenn er dahin geht. Die Wirkung des Erdmagnetismus auf die beiden verticalen Ströme ist hier gleich und entgegengesetzt, sie fällt daher weg und die Drehung geschieht nur in Folge der Einwirkung des Erdmagnetismus auf die horizontalen Ströme. —



Um die Richtung des Stromes bei den Versuchen, welche man mittelst des Stativs auf Seite 647 anstellt, schnell umkehren zu können, ohne sonst etwas an dem Apparate ändern zu müssen, hat man nach Ampère eine zweckmäßige Vorrichtung, welche den Namen Gyrotrop führt. Auf einem Brette, welches auf den Fuß des betreffenden Apparates gestellt werden kann, sind 6 Höhlungen angebracht, welche überfirnißt und mit Quecksilber gefüllt sind. Die





Höhlungen a, b und c, d sind durch Kupferstreifen mit einander verbunden, deren Berührung am Kreuzungspunkte durch einen nichtleitenden Körper verhindert wird. Bringt man nun m mit d und n mit b auf irgend eine Art in leitende Verbindung, so wird die

Digitized by Google

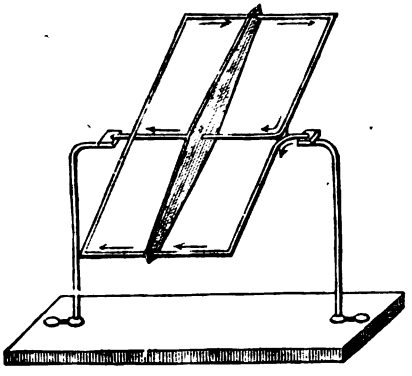
Höhlung c, welche zu der einen Säule des Stativs führt, positiv, die Höhlung a aber, welche zu der anderen Säule führt, negativ elektrisch, falls man nämlich m mit dem positiven und n mit dem negativen Poldrahte der Kette in Berührung bringt. Der Strom geht also in dem soeben betrachteten Falle von c durch den elektromagnetischen Apparat nach a und von hier zu dem negativen Pole der Kette. Umgekehrt ist es, wenn man m mit a und n mit c verbindet. Um nun diese Verbindung bequem herstellen und leicht abändern zu können, dienen Fig. 2 vier Metallbügel, welche durch zwei nichtleitende Querstäbe an einem drehbaren hölzernen Stabe befestigt sind. Setzt man den einen Fuß des Bügels r in die Höhlung m, den anderen Fuß in die Vertiefung d, so sind m und d durch den Bügel r und auf dieselbe Weise b und n durch den nächsten Bügel mit einander verbunden. Die Bügel p und q stehen dabei in die Höhe, werden sie aber niedergedrückt, so bringen sie m mit a und n mit c in Verbindung, während die Verbindung zwischen m und d, wie zwischen n und b dadurch, daß die Bügel r, s in die Höhe kommen, unterbrochen wird.

220. Wir haben gesehen, daß ein von Elektricität durchströmter Schraubendraht sich auf ähnliche Weise wie ein Magnet verhält. Hierauf gestützt nahm Ampère an, daß auch die Polarität der gewöhnlichen Magnete in elektrischen Strömen begründet sei, welche die einzelnen Massentheilchen umkreisen und so in sich selbst zurückkehren. Eine unendlich dünne Magnetnadel ist hiernach als ein System geschlossener, unter sich paralleler Ströme zu betrachten, durch deren Bahnebenen die Nadel senkrecht hindurchgeht; ein Magnetstab ist ein Inbegriff solcher gleich langer, paralleler Nadeln. Mit Beachtung der Gesetze, nach welchen sich parallele elektrische Ströme anziehen und abstoßen, ergiebt sich leicht, warum zwischen ungleichnamigen Polen Anziehung, zwischen gleichnamigen Abstoßung stattfindet. Daß übrigens die Wirkungsweise eines Systems paralleler elektrischer Ströme von der eines Magneten noch wesentlich abweicht, haben wir schon bemerkt.

Nach dieser Hypothese hat auch der Erdmagnetismus seinen Grund in elektrischen Strömen, welche dem scheinbaren Laufe der Sonne entgegen von West nach Ost um die Erde kreisen. Die resultirende Kraft dieser Ströme läßt sich durch einen einzigen Strom im magnetischen Aequator vorstellen. Da ein geschlossener Strom, welcher um eine verticale Axe drehbar ist, sich stets senkrecht zum magnetischen Meridian stellt und mit dem Theil nach West richtet, in welchem der

Digitized by Google

Strom niedergeht, so muß allerdings der Erdstrom, dessen Wirkung die des Erdmagnetismus vertreten soll, von West nach Ost gehen. Die Lage dieses Stromes ergiebt sich aber auf folgende Weise. Ein geschlossener Strom, welcher sich frei um eine horizontale Axe drehen kann, nimmt eine zur Inclinationsnadel senkrechte Lage an, sofern die Axe zum magnetischen Meridian rechtwinkelig ist. Es läßt sich dies zeigen, wenn man den nebenstehenden Apparat, welcher von einem elektrischen Strome durchlaufen wird, so stellt, daß seine horizontale Umdrehungsaxe senkrecht auf den magnetischen Meridian, also in die Richtung des fingirten Erdstromes zu stehen kommt. Die Axe ist an ihren Enden mit Stiften versehen und ruht mittelst derselben in den Vertiefungen zweier Metallstäbe, welche mit den Polen einer starken Kette in Verbindung stehen. Sobald der Strom beginnt, stellt sich das Rechteck rechtwinkelig auf die Richtung der Inclinationsnadel, woraus man schließen kann, daß auch der angenommene Erdstrom in einer auf der Inclinationsnadel senkrechten Ebene liegt.



Aus dem Umstande, daß man sich die Wirkung des Erdmagnetismus durch die Wirkung solcher elektrischer Ströme vertreten denken kann, folgt freilich noch lange nicht die Existenz derselben. Im Innern der Erde sind wohl elektrische Ströme zu erwarten, ob aber von einer solchen Anordnung, wie sie diese Hypothese verlangt, ist sehr die Frage. For brachte die Drahtenden eines Multiplicators mit verschiedenen Stellen eines unterbrochenen Metallganges in Berührung und erhielt die Anzeige eines elektrischen Stromes. Die aufgefundenen Ströme hatten aber in parallelen von Ost nach West laufenden Gängen eine Richtung von Nord nach Süd und an Orten, welche vertical unter einander lagen, eine Richtung von oben nach unten. Nach Beobachtungen, welche Reich in den Freiberger Gruben anstellte, waren diese Ströme von der Richtung der Weltgegend und von der Tiefe unabhängig.

Man hat mit Recht gegen die Ampère'sche Theorie des Magnetismus eingewendet, daß sie ein selbstständiges Fortbestehen

Digitized by Google

elektrischer Ströme auf eine Weise verlangt, welche mit dem gewöhnlichen Verhalten der Elektricitätsleiter, zu denen die des Magnetismus fähigen Metalle gehören, nicht wohl zu vereinbaren ist. Wie leicht auch das Elektricum in Leitern in Bewegung gesetzt werden kann, so muß es doch bald in's Gleichgewicht mit sich selbst kommen, wenn nicht eine constante Ursache vorhanden ist, welche die Bewegung erhält. Auch hat Weber zuerst gezeigt, daß die früher betrachtete Rotation eines Magneten um seine eigene Axe nach der Ampère'schen Hypothese sich nicht füglich erklären läßt, da die Wirkung eines Stromes im Magneten selbst auf die magnetischen Massentheilchen keineswegs eine Bewegung desselben Systems hervorbringen kann. Ein System unveränderlich mit einander verbundener Punkte kann nicht durch innere Kräfte, welche zwischen den verschiedenen Punkten dieses Systems wirken, in Bewegung gesetzt werden. Geht dagegen der elektrische Strom frei durch den Magneten, so sieht man wohl ein, daß er durch seine Wirkung auf die magnetischen Massentheilchen eine Drehung des Magneten veranlassen kann. —

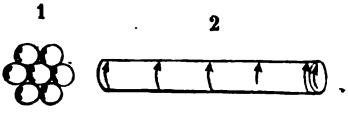
Wenn man indessen seine Aufmerksamkeit einem anderen Elemente schenkt, welches mit dem galvanischen Strome gleichzeitig in Thätigkeit tritt, so läßt sich eine nicht unwahrscheinliche Erklärungsweise der elektromagnetischen Erscheinungen gewinnen, welche mit der früher aufgestellten Theorie des Magnetismus oder, wenn man will, mit der Annahme eines besonderen magnetischen Principes im Einklange steht.

Wenn die Elektricität den Schließungsdraht einer galvanischen Kette oder Säule durchströmt, so müssen jedenfalls die Sphären des Wärmeäthers, welche die Massentheilchen des Drahtes einhüllen, aus dem Gleichgewichte kommen. Der Wärmeäther erleidet von zwei Seiten her eine Aufregung, zufolge deren er sich theils in dem Leitungsdrahte weiter zu verbreiten strebt, theils aus ihm hervorstrahlt. Jede Wärmesphäre erfährt von entgegengesetzten Richtungen her einen Druck, so daß aus diesem Grunde ihre Elemente sich nach einer Richtung vom Molecül, das sie einhüllen, zu entfernen suchen, die auf die Oberfläche des Drahtes senkrecht ist. Vermöge der Anziehung aber, welche zwischen den Massentheilchen und den Elementen des Wärmeäthers besteht, strebt der letztere fortwährend, die ersteren von Neuem in der Form von Sphären einzuhüllen. Wenn nun diese Sphären nicht genau einen centralen Druck und Gegendruck empfangen und ausüben, so ist mit Rücksicht auf das unmittelbar Vorhergehende zu erwarten, daß sie einen Antrieb zur Umdrehung um die Massentheilchen, ihre Centralpunkte, erhalten. Wenn der Wärmeäther

Digitized by Google

von zwei Seiten her wider sich selbst drängt, so kann daraus kein eigentliches Fortschreiten nach der Richtung der Axe des Drahtes entstehen, vielmehr ist es wahrscheinlich, daß dieses Drängen zu einem seitwärts gehenden Drucke führt, welcher alle Sphären zur Umdrehung nach einerlei Richtung veranlaßt, in der Art, daß die Axe des Drahtes oder die Richtung des elektrischen Stromes die Axe dieser Drehung ist. Die letztere hat also gewissermaßen ihren Ursprung in zwei Strömungen des Wärmeäthers, welche von entgegengesetzten Seiten her zusammenstoßen und zwar unter verschiedenen Umständen, da der Wärmeäther von der einen Seite her mit dem elektrischen Strome geht, von der anderen Seite her aber gegen ihn gerichtet ist. Diese Umstände können von wesentlichem Einflusse auf die Richtung der Drehung sein.

Während also die Elektricität den Schließungsdraht durchströmt, werden die Massentheilchen eines jeden Querschnittes des Drahtes von den Elementen des Wärmeäthers nach einerlei Richtung umkreist, etwa auf eine Weise, wie die Figur zeigt, wenn diese den Querschnitt darstellt. Natürlich kann man sich den Draht statt aller elementarer Ströme der Massentheilchen von einem einzigen Strome umkreist denken, wie in Fig. 2.



Bei der Betrachtung des Magnetismus haben wir Seite 504 unbestimmt gelassen, durch welche Aetherart die Polarität desselben fortgepflanzt werde. Wir wollen nun annehmen, es sei der in der Materie gebundene Wärmeäther, welcher dieselbe in die Umgebung forttrage. Diese Annahme ist ohne Zweifel erlaubt, zumal wenn man bedenkt, daß der Wärmeäther wegen seiner starken Anziehung zur Materie sehr geeignet ist, die ruhige, aber starke Wirkung des Magnetismus in die Ferne fortzupflanzen. Bringt man nun über den Schließungsdraht im Sinne seiner Länge eine Magnetnadel, so sieht man aus der beigegebenen Figur, daß die Einwirkung, welche sie von dem kreisenden Wärmeäther erfährt, nicht längs der Verbindungslinie zwischen dem Stromtheilchen a und dem Magnetpole n stattfinden kann, sondern senkrecht gegen dieselbe oder senkrecht gegen die Ebene, welche man sich durch diese Linie im Sinne der Richtung des Schließungsdrahtes und dem magnetischen Theilchen gelegt denken kann. Weiter sieht man, daß derselbe Pol, welcher oberhalb des Drahtes z. B. nach der Rechten abgelenkt ist, auf der rechten Seite des Drahtes abwärts, unterhalb

Digitized by Google

des Drahtes nach links und auf der linken Seite des Drahtes aufwärts bewegt werden muß. Man erkennt also, daß dieser Strom in je zwei diametral gegenüberliegenden Punkten des Schließungsdrahtes entgegengesetzte Richtungen hat, daß er daher auch in diesen Punkten denselben Pol der Magnetnadel im entgegengesetzten Sinne ablenken wird. Der Schließungsdraht stellt also in dieser Beziehung einen Transversalmagneten dar.

Denkt man sich zwei parallele Schließungsdrähte, in denen der elektrische Strom sich nach derselben Richtung bewegt, so werden auch die Ströme des Wärmeäthers in beiden Drähten in demselben Sinne kreisen. Bewegt sich also der Wärmeäther in dem einen Drahte von der Linken gegen die Rechte, so wird dies auch in dem anderen Drahte der Fall sein, wie es die Pfeile in den nebenstehenden Figuren, welche die Querschnitte der beiden Drähte vorstellen sollen, andeuten. Betrachten wir aber die beiden einander zugewandten Seiten dieser Drähte, so sehen wir, daß die Ströme hier einander gerade entgegengesetzt sind. Wird nun die Anziehung der beiden Drähte, wenn sie einander nahe genug und hinreichend beweglich sind, durch den Wärmeäther bewirkt, so findet man auch hier das allgemeine Gesetz, daß sich Ungleichartiges anzieht, und der Umstand, daß die Drähte bei einerlei Richtung des elektrischen Stromes sich anziehen, verliert sein Auffallendes, da nur unter dieser Bedingung jener Gegensatz hinsichtlich des strömenden Wärmeäthers stattfindet. Werden aber die beiden Drähte von entgegengesetzten elektrischen Strömen durchlaufen, in welchem Falle auch die Ströme des Wärmeäthers in entgegengesetzten Richtungen kreisen, so haben diese Ströme in den einander zugewendeten Seiten der beiden Drähte gleiche Richtung und es entsteht unter den gehörigen Umständen eine Abstoßung zwischen ihnen.

Dieser magnetische Zustand des Schließungsdrahtes kann natürlich nicht länger als der elektrische Strom dauern, da mit dem Aufhören des letzteren die Sphären des Wärmeäthers wieder in ihren früheren Gleichgewichtszustand zurückkehren müssen.

Nach diesen Betrachtungen besteht zwischen Elektricität und Magnetismus vermittelst des Wärmeäthers zwar eine innige Beziehung, aber keine Identität. Wir werden hierauf noch einmal in der Lehre von der Thermoelektricität zurückkommen.

221. Das von Ampère entdeckte Gesetz, daß die Wechselwirkung zweier Stromelemente im zusammengesetzten Verhältnisse ihrer Intensitäten und im umgekehrten des Quadrates der Entfernung steht, hat

Digitized by Google

W. Weber durch den Versuch bestätigt, wozu er sich eines Apparates bediente, den er Elektro-Dynamometer nennt. Derselbe besteht im Wesentlichen aus zwei Drahtrollen, von denen die eine fest steht, während die andere beweglich an zwei Fäden aufgehängt ist. Die letztere heißt ihrer Aufhängungsart wegen Bifilarrolle und besteht aus einem dünnen, 30 Millimeter breiten Messingringe, um den ein mit Seide übersponnener, 1/2 Millimeter dicker Kupferdraht in etwa 3000 Windungen herumgeht. Vermittelst eines Torsionskreises, welcher aus zwei horizontalen Scheiben besteht, von denen die eine (untere) durch eine messingene Klammer mit der Bifilarrolle fest verbunden ist, während die andere auf der ersten um eine verticale Axe gedreht werden kann, läßt sich der horizontalen Axe dieser Rolle jede beliebige Lage geben.

Bringt man diese Axe in die Richtung des magnetischen Meridians, so hat der Erdmagnetismus auf die Stellung der Rolle keinen Einfluß, wenn sie von einem elektrischen Strome durchflossen wird. Außerdem ist die Bifilarrolle mit einem Planspiegel verbunden, in dem sich die Theilstriche einer in einer bestimmten Entfernung horizontal aufgestellten Scala spiegeln. Hierdurch wird es möglich, die Bewegungen der Rolle auf dieselbe Weise mit Hülfe eines Fernrohres zu beobachten, wie die Schwingungen des früher beschriebenen Magnetometers. Um die Rolle gegen den Einfluß der Luft zu schützen, ist sie von einem hölzernen Gehäuse umgeben, in welches aber eine Glasscheibe eingesetzt ist. Die feste Rolle besteht aus zwei dünnen parallelen Messingplatten von 88 Millimeter Durchmesser, welche durch eine 5 1/2 Millimeter dicke Axe aus Messing mit einander verbunden sind. Der Raum zwischen beiden Platten ist mit einem 1/2 Millimeter dicken übersponnenen Kupferdrahte ausgefüllt, welcher in etwa 10000 Windungen um jene Axe herumgeht. Die Einrichtung ist so getroffen, daß man den Mittelpunkt der festen Rolle sowohl in den Mittelpunkt der beweglichen als auch in eine beliebige Entfernung davon bringen kann.

Läßt man nun durch die Drähte des Apparates nach einander elektrische Ströme von verschiedener Stärke hindurchgehen, so kann man die hieraus entspringenden Ablenkungen der Bifilarrolle mittelst des Fernrohres beobachten und, da die feste Rolle auf entsprechende Weise mit dem Multiplicatorgewinde eines Magnetometerstabes communicirt, auch gleichzeitig die durch die Ströme bewirkten Ablenkungen des Magnetstabes oder die betreffenden Stromstärken wahrnehmen. Aus diesen Beobachtungen ergab sich nun mit Evidenz, daß

Digitized by Google

die Wechselwirkungen der festen und beweglichen Rolle sich wie die Quadrate der betreffenden Stromintensitäten verhalten.

Alsdann wurde die feste Rolle nach und nach längs des magnetischen Meridians in verschiedene Entfernungen von dem Mittelpunkte der Bifilarrolle gebracht, während der durch den Apparat gehende Strom unverändert blieb. Die für verschiedene Entfernungen beobachteten Ablenkungen der Bifilarrolle stimmten mit den nach der Gauß'schen Formel, welche das Gesetz der Wechselwirkung zweier Magnete oder eines Magneten und eines geschlossenen Stromes ausdrückt, berechneten Werthen der Ablenkung möglichst überein. Dieselbe Uebereinstimmung stellte sich heraus, als Weber die Einwirkung der festen auf die bewegliche Rolle nach einer von Ampère entwickelten Formel, welche die Wechselwirkung zweier Stromelemente im Raume angiebt, für verschiedene gegenseitige Lagen und Entfernungen ihrer Mittelpunkte berechnete und mit den unter denselben Umständen beobachteten Werthen verglich.

222. Der Schließungsdraht einer Volta'schen Kette wirkt nicht nur ablenkend auf die Magnetnadel, sondern er zieht auch Eisenfeile an und ist selbst im Stande, Eisen und Stahl magnetisch zu machen. Bringt man aber mit dem Drahte, während er von der Elektricität durchströmt wird, Eisentheilchen in Berührung, so ordnen sich diese nicht wie an einem gewöhnlichen Magneten, sondern sie wickeln den Draht ein und legen sich der ganzen Länge nach quer um ihn herum. Diese Erscheinung wurde von Arago zuerst beobachtet. Um sie deutlich wahrzunehmen, ist ein kräftiger Strom nöthig, durch welchen der Draht merklich erwärmt wird. Man kann auch dem Schließungsdrahte die Form einer horizontal liegenden Spirale geben. Bringt man nun nahe über die letztere eine Glastafel, auf welcher die Eisenfeile gleichförmig ausgebreitet ist, so ordnet sich diese, wenn man schwach an die Tafel klopft, zu so vielen concentrischen Ringen, als Spiralringe vorhanden sind. Von diesen Ringen gehen wieder kleine Strahlen aus, welche auf ihnen senkrecht stehen, indem sie nach der Mitte der Spirale hingerichtet sind.

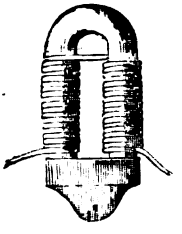
Zum Behufe der Magnetisirung von Stahlnadeln muß der Draht quer über oder unter der Nadel, am besten in einer auf der Axe der Nadel senkrechten Richtung fortgeführt werden. Um die Wirkung zu verstärken, windet man den Schließungsdraht der Kette schraubenförmig um eine Glasröhre, in welche man die Nadel legt. Die Lage der Pole in der auf diese Weise magnetisirten Nadel ist durch die Richtung der Drahtwindungen bedingt. Ist die Spirale rechts

Digitized by Google

gewunden, wie die Gänge der gewöhnlichen Schraube, so bekommt die Nadel ihren Südpol da, wo der Strom eintritt, bei einer links gewundenen aber an dem Ende, wo er austritt. Wenn man den Schließungsdraht, nachdem er eine Strecke rechts aufgewunden ist, rückwärts bewegt und eine Strecke weit links windet, dann wieder in entgegengesetzter Richtung um dieselbe Glasröhre fortführt, u. s. w., so entstehen in einem in die Röhre gelegten, etwas langen Eisendrahte mehrere mit einander abwechselnde Pole oder sogenannte Folgepunkte, welche auch oft beim gewöhnlichen Magnetisiren, namentlich in längeren Stäben, hervortreten.

Das Magnetischwerden von Stahlnadeln findet auf dieselbe Weise statt, wenn man eine Leidner Flasche durch die Spirale entladet.

Weichem Eisen kann man durch den elektrischen Strom einen außerordentlich starken Magnetismus mittheilen. Man giebt zu diesem Behufe einem cylindrischen Stabe aus weichem Eisen die Form eines Hufeisens, dessen Schenkel mit einem etwas dicken Kupferdraht, der mit Seide übersponnen ist, nach derselben Richtung umwickelt werden. An die Enden des Drahtes sind Schälchen gelöthet, welche man mit Quecksilber füllt, um sie mit den Polen einer galvanischen Kette bequem in Verbindung setzen zu können. Auf diese Weise hat man Magnete erzeugt, die mehr als 2000 Pfund zu tragen im Stande waren. Obgleich die Tragkraft der beiden Pole eines solchen Elektromagneten sehr bedeutend ist, wenn sie durch den Anker geschlossen sind, so trägt doch jeder einzelne Pol für sich nur eine verhältnißmäßig sehr geringe Last. Es ist daher die gegenseitige Einwirkung der Pole des Elektromagneten und des sie schließenden Ankers auf die Tragkraft von sehr wesentlichem Einflusse. Der Magnetismus des weichen Eisens dauert nur so lange, als der Strom durch den Kupferdraht circulirt; nur wenn man den Anker mit den Schenkeln des Hufeisens in Berührung läßt, hält er noch eine Zeitlang an.



Keßler-Gondart hat bei der Bildung von Elektromagneten eine bemerkenswerthe Beobachtung gemacht. Derselbe vernahm nämlich ein Tönen, welches vom Eisen ausging, wenn die galvanische Kette geschlossen oder wieder geöffnet wurde, und das mit der Stärke der Kette ab- und zunahm. Die Vermuthung, daß dieses Tönen von der Lagenveränderung der Molecüle des Eisens während der Erzeugung und Aufhebung des Magnetismus herrühre, ist sehr wahrscheinlich und entspricht unserer Ansicht über das Wesen des Magne-

Digitized by Google

tismus. Auch Page und Delezenne vernahmen ein Tönen, wenn die Polarität der Magnete eine vorübergehende Störung erlitt. Page gab einem langen mit Baumwolle überzogenen Kupferdrahte die Form einer platten Spirale von 40 Windungen, befestigte sie vertical und brachte ihre Enden mit den Polen einer ziemlich entfernten, einfachen galvanischen Kette in leitende Verbindung. Hierauf schob er einen Hufeisenmagnet dergestalt über die Spirale, daß diese zwischen die Schenkel desselben zu stehen kam. So oft nun der galvanische Strom durch die Spirale geleitet wurde, drang aus dem Magneten ein Ton hervor, dessen Höhe von der Stärke des ersteren abhängig war.

Die Gesetze, nach denen die Stärke des im weichen Eisen erregten Magnetismus von der Beschaffenheit der einzelnen Elemente, welche zu seiner Erzeugung verwendet werden, abhängt, sind von Lenz und Jacobi genauer erforscht worden.

Die Stärke des hervorgerufenen Magnetismus ist den elektrischen Strömen genau proportional. Da es hier also vorzugsweise auf die Quantität der Elektricität ankommt, so wendet man als Kette ein einfaches Plattenpaar von großer Oberfläche an. Die Dicke des Leitungsdrahtes ist bei gleicher Anzahl der Windungen und bei gleicher Stärke des Stromes ohne Einfluß auf die Stärke des erregten Magnetismus; doch geben bei schwächeren Ketten dickere Drähte, weil sie dem Strome einen geringeren Widerstand entgegensetzen, einen kräftigeren Magnetismus als dünnere. Uebrigens ist unter sonst gleichen Umständen die Totalwirkung sämmtlicher den Eisenkern umgebenden Windungen gleich der Summe der Wirkungen aller einzelnen Windungen. Die Weite der letzteren oder der Durchmesser der Spirale ist von keiner Bedeutung für die Stärke des Magnetismus, falls das Eisen weit genug aus derselben hervorragt. Ist das Letztere aber nicht der Fall, so ist die Wirkung der engen Windungen etwas größer als die der weiteren. Das Maximum des Magnetismus tritt ein, wenn der gesammte Widerstand des Schraubendrahtes gleich ist dem Gesammtwiderstande der Kette. Die Maxima des Magnetismus verhalten sich hiernach wie die Quadratwurzeln der Zinkoberflächen in der Batterie. Außerdem ist die Stärke des auf diese Weise erregten Magnetismus auch noch von der Masse des Eisens abhängig. Bei Stäben von gleicher Länge und bei gleichen Strömen ist er ihren Durchmessern proportional. Nach Ritchie ist bei hufeisenförmigen Stäben der Magnetismus um so bedeutender und nachhaltiger, je größer der Bogen des Hufeisens ist.

Digitized by Google

Der Elektromagnet läßt sich auch mit großem Vortheile zur Erzeugung von Magnetnadeln benutzen. Zu diesem Behufe legt man nach Dove unter die beiden Pole des ersteren zwei Stücke Eisen und auf diese die Nadel und wendet dann die Methode des Doppelstriches an. Hierauf entfernt man die Nadel in der Weise von den beiden Eisenstücken, daß man die letzteren von ihr nach außen fortschiebt, während die Kette noch geschlossen ist. —

Faraday machte die Entdeckung, daß die Pole eines sehr kräftigen Elektromagneten beinahe auf alle in der Nähe befindlichen Körper eine bestimmte Wirkung ausüben, welche aber verschieden ist, je nachdem der Körper in die Klasse der eigentlich magnetischen Stoffe gehört oder nicht. Hiernach theilte Faraday die Körper in zwei Klassen, nämlich in magnetische und diamagnetische. Zur ersten Klasse gehören außer den bekannten magnetischen Stoffen noch Chrom, Mangan, Cerium, Titan, Palladium und vielleicht auch Platin und Osmium, nebst den Verbindungen der genannten Körper. Zur zweiten Klasse gehören die übrigen Körper, sie mögen nun Leiter oder Nichtleiter der Elektricität sein. Stark zeigt sich die Wirkung beim Wismuth, Antimon, Phosphor, Zinn und bei schweren, eisenfreien Glasforten, viel schwächer bei verschiedenen tropfbaren Körpern, aber gar nicht bei allen gas- und dampfförmigen Körpern.

Die materiellen Theilchen der magnetischen Körper werden nun von den Polen des Elektromagneten angezogen. Die Resultirende dieser Anziehung geht durch den Schwerpunkt der Masse, wenn die Körper eine regelmäßige Gestalt und einen geringen Umfang besitzen, so daß alle Theilchen gleich weit von dem betreffenden Pole entfernt sind.

Die materiellen Theilchen der diamagnetischen Körper werden von den Polen des Elektromagneten abgestoßen. Auch hier ist die Resultirende der Abstoßung unter den angegebenen Umständen gegen den Schwerpunkt der Masse gerichtet.

Hängt man einen Würfel von Flintglas oder Antimon gerade zwischen den Polen eines hufeisenförmigen Elektromagneten mittelst eines Fadens auf, so daß er genau in die Mitte der Verbindungslinie beider Pole kommt, so bleibt er ruhig schweben, weil die Wirkungen der beiden Pole gleich und entgegengesetzt sind. Nähert man ihn aber mehr dem einen oder anderen Pole, so beobachtet man beim Schließen der Kette sogleich eine Abstoßung. Hängen zwei Würfel neben einander und zwar der eine rechts, der andere links von der Verbindungslinie der Pole, so entfernen sie sich von einander, sobald die Kette geschlossen

Digitized by Google

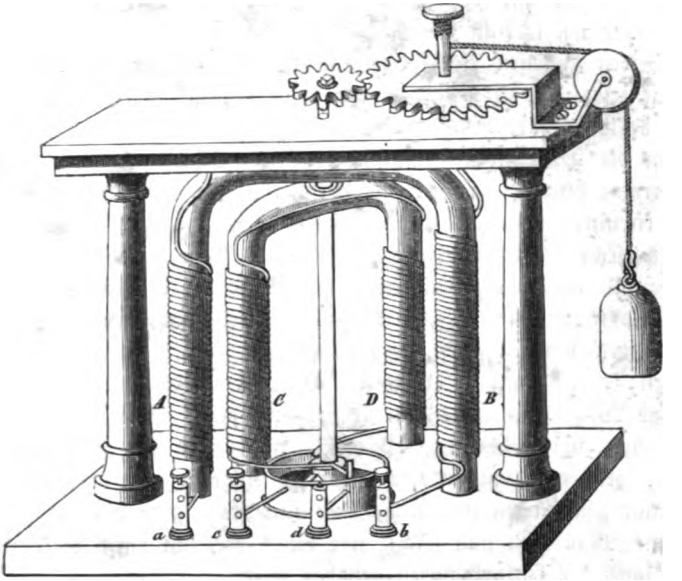
ist. Befinden sich aber die Würfel gerade in der Verbindungslinie der beiden Pole, so nähern sie sich einander und scheinen sich gegenseitig anzuziehen, weil jeder von dem entsprechenden Pole abgestoßen wird.

Wenn diamagnetische Körper mit magnetischen verbunden sind, so stören sie sich gegenseitig in ihrem eigenthümlichen Verhalten. Je nach dem Mischungsverhältnisse herrscht die eine oder die andere der erwähnten Eigenschaften vor, wenn sie nicht beide verschwinden. Doch ist beinahe in allen Verbindungen magnetischer Körper mit nichtmagnetischen Metallen der gewöhnliche Magnetismus vorherrschend. In allen von Faraday untersuchten Verbindungen diamagnetischer Körper unter einander war nicht die geringste Spur des gewöhnlichen Magnetismus zu entdecken. Unter denen des eigentlichen Magnetismus fähigen Körpern fand Faraday keinen, der durch Temperaturerhöhung die obige Eigenschaft ganz und gar einbüßte, aber auch unter den diamagnetischen keinen, der durch Temperaturerniedrigung im gewöhnlichen Sinne magnetisch wurde.

223. Man hat versucht, den Elektromagnetismus als bewegende Kraft zum Betriebe von Maschinen zu benutzen. Daß dies überhaupt sehr wohl möglich ist, ergiebt sich aus dem bisher Gesagten leicht. Jacobi in Petersburg construirte zuerst einen Apparat, welcher auf der wechselseitigen Anziehung und Abstoßung zweier Eisenstäbe beruht, die vermittelst des elektrischen Stromes in regelmäßigem Wechsel bald nord- bald südpolar gemacht werden. Es läßt sich hierdurch eine continuirliche Kreisbewegung hervorbringen, welche zur Bewegung verschiedener Maschinen benutzt werden kann. Jacobi setzte auf der Newa eine kleine Kriegsschaluppe, welche 28 Fuß lang, 7½ Fuß breit und nach Art der Dampfschiffe mit 8 Ruderrädern versehen war, mit einer Geschwindigkeit von 3 Fuß in 1 Secunde stromaufwärts in Bewegung. Dieselbe trug 14 Personen. Der Volta'sche Apparat, welcher den elektrischen Strom lieferte, bestand aus 320 Plattenpaaren, jede Platte von 36 Quadratzoll Oberfläche. Die ganze Betriebsmaschine nahm auf dem Boote einen Raum von 12⅙ Fuß Breite und 2 1/12 Fuß Länge ein. Durch eine zweckmäßigere Anordnung der magnetisirten Stäbe und durch Anwendung einer Grove'schen Zinkplatinbatterie von 64 Plattenpaaren, jede Platte von 36 Quadratzoll Oberfläche, erhöhte Jacobi die Kraft seiner Maschine dergestalt, daß sich jenes Boot auf der Newa mit derselben Geschwindigkeit stromaufwärts bewegte, wie ein Dampfschiff, das mit derselben Last beschwert war.

Digitized by Google

Mit Hülfe des folgenden Apparates läßt sich leicht einsehen, wie durch den Elektromagnetismus eine continuirliche Kreisbewegung hervorgebracht werden kann.



Das Hufeisen AB ist auf dem Fußgestelle des ganzen Apparates befestigt und mit einem Kupferdraht umwickelt, von dessen Enden das eine zu dem Messingsäulchen a, das andere zum Säulchen b geht. In diese Säulchen werden die Poldrähte einer kräftigen galvanischen Kette eingeschraubt. Das innere Hufeisen ist wie das erstere mit Kupferdraht umwickelt, dessen Enden in eine hölzerne, mit Queckſilber gefüllte Rinne tauchen, welche durch zwei Scheidewände von Holz in zwei Fächer getheilt ist. Jede der letzteren ist so weit mit Queckſilber gefüllt, daß die Oberfläche desselben über die Scheidewand hervorragt, ohne daß es aber aus dem einen Fach in das andere überfließen kann. Das eine Fach ist durch einen Kupferdraht mit dem Messingsäulchen c, das andere auf dieselbe Weise mit dem Säulchen d in Verbindung. Auch in diese Säulchen sind die Poldrähte einer galvanischen Kette eingeschraubt. Die Enden des um das Hufeisen CD gewickelten Drahtes tauchen so weit in das Queckſilber der beiden Fächer, daß sie bei der Umdrehung von CD um eine verticale Axe bequem über die Scheidewände der beiden Fächer hinwegkommen. Man sieht nun leicht, wie bei dieser Umdrehung der Strom der Kette

Digitized by Google

von dem einen der beiden Säulchen c und d, z. B. von c in das Queckſilber des einen Faches und von da durch den Kupferdraht in der Richtung von D nach C um das innere, bewegliche Hufeiſen herum in die andere Abtheilung der Rinne nach dem Säulchen d geht, um von hier in die Kette zurückzukehren. Es wird dann, wenn die beiden Hufeiſen eine ſolche Stellung zu einander haben, wie die Figur zeigt, C von A und D von B angezogen, ſo daß CD zu rotiren beginnt; ſobald aber C wieder bei A und D bei B ankommt, gehen die Drahtenden von CD über die Scheidewände der Queckſilberrinne hinweg, der Strom, welcher in den Drahtwindungen von CD circulirt, wird momentan unterbrochen und geht dann in entgegengeſetzter Richtung durch den Draht. Nun wird C von A und D von B abgeſtoßen, während ſich C und B, D und A anziehen. Die Rotation von CD geht deshalb in derſelben Richtung fort und wird eben durch die periodiſche Umkehrung der Pole auch darin erhalten; denn ſobald C bei B und D bei A ankommt, findet auf die vorige Weiſe eine wiederholte Umkehrung dieſer Pole ſtatt, u. ſ. f. Die Axe, um welche ſich CD dreht, trägt oben ein gezahntes Rädchen, welches in ein anderes, größeres eingreift, um deſſen Axe eine Schnur geſchlungen iſt, welche über eine Rolle geht und ein Gewicht trägt. Man ſieht nun leicht, wie dieſes Gewicht durch die Rotation des inneren Elektromagneten gehoben wird.

Die Frage, ob die Dampfkraft durch den Elektromagnetismus erſetzt werden kann, läßt ſich gegenwärtig noch nicht entſcheiden. Die Hinderniſſe, welche ſich der techniſchen Benutzung des Elektromagnetismus im Großen entgegenſtellen, werden wir zum Theil bei Gelegenheit ſpäterer Betrachtungen kennen lernen.

224. Die elektriſchen Telegraphen ſind eine zweite ſinnreiche Anwendung, welche man vom Elektromagnetismus mit Rückſicht auf die ſchnelle Fortpflanzung elektriſcher Ströme in iſolirten Leitungsdrähten gemacht hat. Die folgende Figur ſtellt einen Wheatſtone'ſchen Telegraphen dar, an dem man den betreffenden Mechanismus ohne Schwierigkeit überſehen kann.

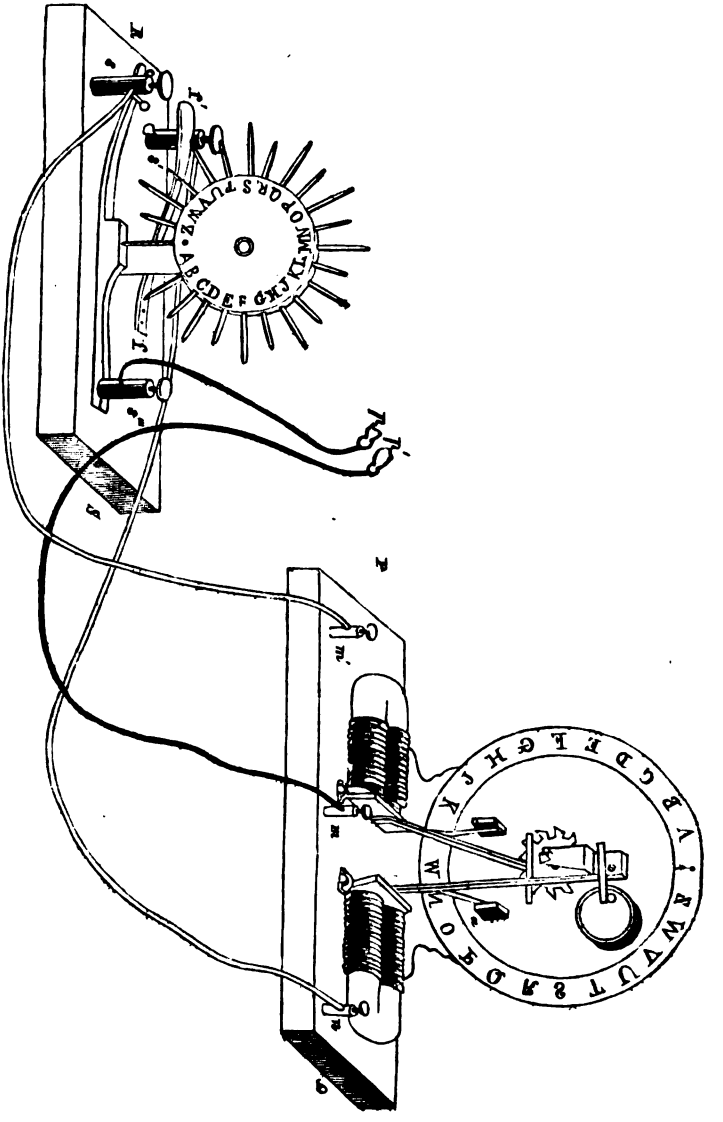
Auf einem Brettchen PQ ſind zwei hufeiſenförmige Stäbe von weichem Eiſen befeſtigt, welche beide mit überſponnenem Kupferdrahte umwickelt ſind. Die Enden des um das rechts gelegene Hufeiſen gewundenen Drahtes gehen unter dem Brettchen her zu den Meſſingſäulchen m und m'. In die letzteren ſind zwei Drähte eingeſchraubt, welche zu der anderen telegraphiſchen Station gehen, wo eine galvaniſche Kette aufgeſtellt iſt. Von hier aus führt auch ein dritter

Digitized by Google

Draht zu dem Messingsäulchen n, mit dem das eine Ende des Drahtes in Verbindung steht, welcher um das links gelegene Hufeisen gewunden ist. Das andere Ende desselben geht unter dem Brette her zu dem Säulchen m. Nahe vor den Polen des letzterwähnten Hufeisens ist nun eine Eisenplatte angebracht, welche unten um zwei Zapfen beweglich und an der ein Stab befestigt ist, welcher oben einen horizontalen Querstab trägt. Wird dieses Hufeisen magnetisch, was durch die Verbindung der betreffenden Drähte mit den Polen der an jenem Orte stehenden Kette leicht bewerkstelligt werden kann, so wird die Eisenplatte von den Polen des entstandenen Elektromagneten angezogen. Diese Anziehung wird sogleich aufgehoben, wenn man den galvanischen Strom unterbricht. Die Platte wird dann durch den Druck einer Feder a gegen den Stab von dem Hufeisen wieder entfernt. Durch abwechselndes Oeffnen und Schließen des Stromes wird nun dem Querstabe eine hin- und hergehende Bewegung ertheilt, wobei er jedesmal vermittelst der an seinen Enden befestigten Kügelchen an ein Glöckchen anschlägt, um ein Signal zu geben. Eine ähnliche Eisenplatte befindet sich vor den Polen des rechts gelegenen Hufeisens, das gleichfalls durch den elektrischen Strom, wenn man die zu m und m' führenden Drähte mit den Polen der Kette verbindet, magnetisch gemacht werden kann. Auch an dieser Platte ist ein Stab befestigt, welcher oben einen Querstab trägt, an dessen Enden wieder zwei Stäbchen angebracht sind. Die letzteren greifen nun bei jedem Hin- und Hergange der Eisenplatte abwechselnd in die Zähne eines Rädchens ein, wodurch dasselbe bei jedem Hin- und Hergange um einen Zahn weiter geschoben wird. An der Are dieses Zahnrades befindet sich eine Scheibe von Eisenblech, auf deren vorderen Seite am Rande ein Punkt und 23 Buchstaben des Alphabets angebracht sind. Auf derselben Seite der Scheibe trägt die Are des Rädchens einen Zeiger, welcher mit dem Rädchen gleichzeitig in der Art fortgeschoben wird, daß er sowohl beim Schließen als auch beim Oeffnen der Kette um einen Buchstaben weiter geht. Ist nun der Zeiger auf den Nullpunkt gestellt, so muß er nach dem Vorhergehenden beim ersten Schließen der Kette auf A, bei der ersten Unterbrechung auf B, bei der nun folgenden Schließung der Kette auf C und bei der nunmehrigen Oeffnung auf D springen, u. s. w. Beim beabsichtigten Buchstaben wird mit dem Glöckchen ein Zeichen gegeben. Es ist also hiernach leicht, jedes Wort zu buchstabiren, da eine auf der anderen Station befindliche Person, welche vermittelst der Volta'schen Kette die abwechselnden Schließungen und Unter-

Digitized by Google

brechungen des Stromes unterhält, den Zeiger auf jeden Buchstaben bringen kann.



Damit aber hinsichtlich der Anzahl dieser Unterbrechungen und Schließungen kein Irrthum vorfalle, wodurch der Zeiger auf einen

Digitized by Google

falschen Buchstaben kommen würde, befindet sich in der Nähe der Volta'schen Kette ein besonderer Regulirapparat. Von dem Pole p' der Kette geht ein Draht zu dem Säulchen m links, während von den Säulchen m' und n Drähte nach den Säulchen s und s' des Regulators führen. Der andere Pol p der Kette steht durch einen kurzen Draht mit dem Säulchen s'' in Verbindung, welches durch einen unter dem Brettchen RS herlaufenden Draht mit der Messingfeder ff' verbunden ist. An dem Säulchen s' ragt unten ein Metallknöpfchen hervor, welches von der Feder ff', wenn man sie niederdrückt, berührt wird. Der Strom geht dann von dem positiven Pol p nach s'' durch die Feder ff' nach s', von wo er durch den langen Draht nach n und durch die Windungen des links gelegenen Hufeisens nach m geht, um von hier nach dem negativen Pole p' der Kette zu fließen. Dieser Strom wird unterbrochen, sobald man die Feder ff' losläßt. Eine andere Messingfeder, welche von s'' ausgeht, berührt ein hervorragendes Knöpfchen am Säulchen s, wodurch die Kette wieder geschlossen ist. Der Strom geht nun vom Pol p nach s'' und durch die Feder s''s nach s und von hier nach m' durch die Windungen des rechts gelegenen Hufeisens nach dem Säulchen m, von dem er nach dem negativen Pol der Kette geht. Um diesen Strom zu unterbrechen, braucht man nur die Messingfeder niederzudrücken. Eine um eine horizontale Axe drehbare Scheibe ist mit 24 Speichen versehen, welche abwechselnd lang und kurz sind; ihnen entsprechen der Punkt und die Buchstaben am Rande der Scheibe. Die Messingfeder befindet sich gerade unter dieser Scheibe, so daß sie jedesmal niedergedrückt wird, wenn eine der langen Speichen vertical nach unten zu stehen kommt. Will man nun den Apparat seiner Bestimmung gemäß in Thätigkeit setzen, so giebt man dieser Scheibe die Stellung, welche sie in der Figur hat. Alsdann macht man die Person auf der anderen telegraphischen Station durch ein Signal mit dem Glöckchen aufmerksam, indem man die Feder ff' niederdrückt. Hierauf stellt man die Speiche A vertical nach unten, die Feder ss'', welche bisher durch die längere Speiche niedergehalten war, geht in die Höhe und schließt durch die Berührung des Knöpfchens an s die Kette. Durch die Thätigkeit des Stromes springt nun auf der anderen Station der Zeiger von . auf A. Wenn man jetzt die nächste Speiche vertical abwärts stellt, so drückt sie wegen ihrer Länge die Feder ss'' nieder, der Strom wird unterbrochen und der Zeiger am anderen Orte springt von A auf B, u. s. w. Sobald der beabsichtigte Buchstabe erreicht ist, drückt man die Feder ff' nieder, um am

Digitized by Google

Glöckchen ein Signal zu geben. Darauf wird die Scheibe am Regulator auf den Nullpunkt zurückgestellt und wieder ein Zeichen am Glöckchen gegeben, damit auch die andere Person den Zeiger auf den Nullpunkt zurückbringe. Alsdann wird zur Signalisirung eines zweiten Buchstaben fortgeschritten, u. s. w.

Nach Steinheil kann indessen einer jener Leitungsdrähte, welche von der einen Station zur anderen gehen, durch die Leitfähigkeit der Erde ersetzt werden, wenn man die letztere vermittelst genügend großer Metallmassen mit dem Apparate in Verbindung bringt.

Auf ähnliche Art sind von Wheatstone elektromagnetische Uhren construirt worden, welche an verschiedenen, weit entfernten Orten die genauesten Zeitangaben mittelst einer einzigen Uhr möglich machen. Uebrigens sind dem Wheatstone'schen Telegraphen in neuerer Zeit einige Vereinfachungen zu Theil geworden, welche wir aber hier nicht weiter verfolgen wollen. Andere Telegraphen beruhen auf magnetoelektrischen Strömen, welche wir im nächsten Kapitel werden kennen lernen.

Sechstes Kapitel.

Elektricität durch Induction.

225. Wenn man einen von Elektricität durchströmten Leiter in der Nähe eines anderen, geschlossenen Leiters vorbeiführt, so entsteht auch in dem letzteren durch die vertheilende Wirkung des ersteren ein elektrischer Strom. Man wickele auf einen Cylinder oder auf eine Spule von Holz einen langen, mit Seide übersponnenen Kupferdraht dergestalt, daß die Windungen nicht sehr dicht an einander liegen, und dann zwischen die letzteren einen zweiten, ähnlichen Kupferdraht, so daß der eine Draht parallel neben dem anderen herläuft, ohne ihn leitend zu berühren. Werden nun die Enden des einen Drahtes mit den Polen einer galvanischen Kette, die Enden des anderen aber mit den Drahtenden eines Multiplicators gut verbunden, so zeigt die Ablenkung der Magnetnadel im zweiten Drahte einen Strom an, dessen Richtung der des vertheilend wirkenden, galvanischen Stromes gerade entgegengesetzt ist. Dieser Strom ist nicht dauernd, denn bald kehrt die Nadel in ihre Ruhelage zurück. Oeffnet man aber die galvanische Kette, wodurch der anfängliche Strom unterbrochen wird, so entsteht in dem Nebendrahte ein zweiter Strom, welcher die entgegengesetzte Richtung des vorigen oder gleiche Richtung mit dem ver-

Digitized by Google

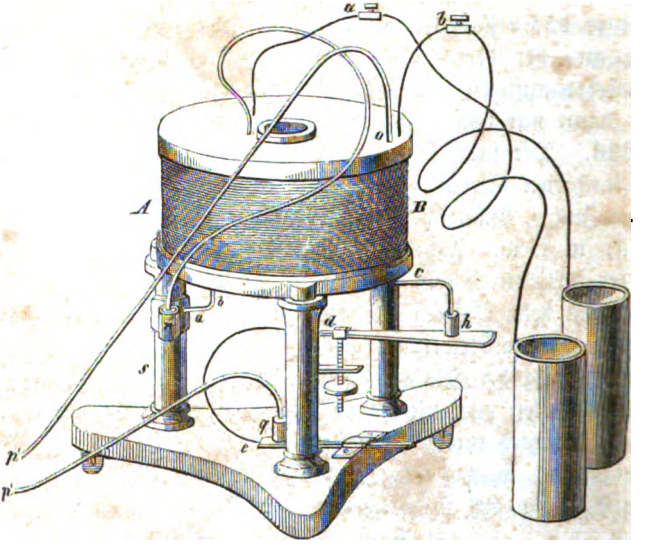
schwindenden Hauptstrome hat. Nach einigen Momenten verliert sich auch dieser Strom und die Nadel geht auf den Nullpunkt zurück. Man nennt solche Ströme, welche durch die vertheilende Wirkung eines anderen hervorgebracht werden, inducirte oder auch, weil sie nur kurze Zeit dauern, temporäre oder endlich in Beziehung auf den Hauptstrom secundäre Ströme. Dieselben wurden von Faraday entdeckt. Er spannte einen mehrere Fuß langen Kupferdraht in weiten Zickzackbiegungen auf die eine Seite eines Brettes aus und befestigte auf dieselbe Weise einen zweiten Draht auf ein anderes Brett. Die Enden des einen Drahtes wurden, wie beim vorigen Versuche, mit dem Multiplicator, die Enden des anderen Drahtes mit den Polen einer galvanischen Kette in Verbindung gesetzt. Hierauf näherte er das erste Brett rasch dem zweiten; die Nadel zeigte einen Strom an, der dem galvanischen Strome entgegengesetzt war, aber bald wieder aufhörte, bis das erste Brett vom zweiten entfernt wurde, wo er dann mit dem Strome der Kette gleiche Richtung annahm.

226. Die inducirten Ströme zeigen alle Eigenschaften der bisher betrachteten Ströme, wie Zuckungen am Froschschenkel, Geschmack auf der Zunge, Lichterscheinungen im Auge, Magnetisirung von Stahlnadeln, u. s. w. Faßt man die beiden Endstücke des Drahtes, in dem der inducirte Strom hervortritt, mit befeuchteten Händen an, so erhält man beim Oeffnen und Schließen der Kette einen Schlag. Die Wirkung auf die Nerven ist im Allgemeinen um so intensiver, je größer die Anzahl der Drahtwindungen ist. Schon eine einfache Kette, mit deren Polen man die Enden des vertheilend wirkenden oder inducirenden Drahtes verbindet, erregt in einer benachbarten Drahtspirale einen Strom, welcher einen kräftigen Schlag giebt. Die physiologische Wirkung des Inductionsstromes kann außerordentlich verstärkt werden, wenn man durch abwechselndes Schließen und Oeffnen der Kette eine rasche Aufeinanderfolge von Schlägen hervorbringt. Hierzu ist ein von Neef und Wagner construirter Apparat vorzugsweise geeignet.

Auf der Spule AB (s. Figur) sind die beiden mit Seide übersponnenen Drähte in der Art und Weise aufgewunden, wie wir oben angegeben haben. Die beiden Enden des Inductionsdrahtes sind a und b. Der eine Poldraht der galvanischen Kette steht mit dem Quecksilbernäpfchen q in Verbindung, von dem wieder eine metallische Leitung edcba nach dem Quecksilbernäpfchen n geht. In das letztere taucht das eine Ende des inducirenden Drahtes, während das andere Ende op' desselben unmittelbar mit dem anderen Pole der Kette verbunden ist. Um

Digitized by Google

den Pfeiler s ist oben ein Metallring gelegt, an welchen das Näpfchen n angelöthet ist. Von diesem Metallringe geht auch der Kupferdraht a b c aus, welcher dicht unter der Inductionsrolle A B hinläuft und bei h mit einem Platinhämmerchen versehen ist. Das letztere ruht auf einem Platinplättchen, an welches auch der Kupferdraht d e angelöthet ist. Man sieht nun klar, wie durch das Heben und Senken des Platinhämmerchens der galvanische Strom abwechselnd unterbrochen und wieder hergestellt wird. Damit nun dieses Spiel durch den Apparat selbst bewerkstelligt werde, steckt in der Inductionsrolle A B ein Cylinder von weichem Eisen, welcher durch den Strom des inducirenden Drahtes magnetisch wird. An dem Drahte a b c, welcher, wie schon bemerkt

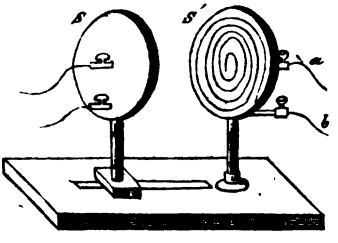


wurde, dicht unter der Rolle hingeht, ist ganz in der Nähe des Cylinders eine horizontale Eisenplatte befestigt, welche von dem magnetisch gewordenen Cylinder angezogen und dadurch gehoben wird. Auf diese Weise geht das Hämmerchen h in die Höhe und der Strom ist unterbrochen. In Folge dessen verliert aber auch das Eisen seinen Magnetismus wieder, die gehobene Eisenplatte fällt herab und das Hämmerchen kommt wieder in Berührung mit dem Platinplättchen. Der Strom ist nun von Neuem hergestellt, der Cylinder wird wieder magnetisch und hebt deshalb die Eisenplatte nebst dem Hämmerchen abermals in die Höhe, u. s. w. Bei d befindet sich noch eine Stellschraube, mittelst deren man die Eisenplatte dem Cylinder mehr oder

Digitized by Google

weniger nahe bringen kann, weil von der Entfernung beider die Schnelligkeit, womit der Strom unterbrochen und wieder hergestellt wird, abhängt. Die metallenen Cylinder, welche an den Enden des Drahtes befestigt sind, worin der inducirte Strom hervortritt, dienen dazu, um die physiologische Wirkung zu verstärken, indem man sie in die befeuchteten Hände nimmt oder mit Wasser füllt und in dieses die Hände taucht. Zum Behufe des medicinischen Gebrauches kann man auch an die Stelle der Cylinder etwas große Metallplatten bringen und dieselben in einer gewissen Entfernung von einander in Wasser tauchen. Zwischen diese Platten wird nun das betreffende Glied des Körpers gebracht, welches auf diese Weise den durch das Wasser gehenden Inductionsströmen ausgesetzt ist.

227. Auch der Schließungsdraht einer Leidner Flasche erregt in benachbarten Leitern einen Strom, dessen Gesetze namentlich von Rieß genauer untersucht worden sind. Er gebrauchte dazu zwei gleiche, platte Spiralen, deren Windungen in die Vertiefungen zweier Holzscheiben eingekittet waren. Die Zwischenräume waren durch Pech ausgefüllt, welches durch heiße Metallplatten geglättet wurde. Die eine Spirale konnte in einer Rinne verschoben und dadurch der anderen beliebig genähert werden. An den Enden der Spiralen befinden sich Klemmschrauben, welche zur Befestigung von Handhaben oder Multiplicatordrähten dienten. Werden nun die Enden der Spirale S mit den Belegungen einer Leidner Flasche oder Batterie in Verbindung gebracht, während man die Spirale S′ durch zwei an a und b angebrachte Handhaben schließt, so erhält man durch den Nebenstrom, welcher in der letzterwähnten Spirale entsteht, einen Schlag. Rieß fand, daß dieser Nebenstrom mit dem Hauptstrome stets gleiche Richtung hat, wovon er sich vorzugsweise durch die Wirkung jenes Stromes auf einen Harzkuchen und den Condensator überzeugte. Wenn man zwei Drähte, welche mit den Belegungen der Leidner Flasche verbunden sind, mit den beiden Seiten eines mit einem feinen Pulver bestreuten Harzkuchens in Berührung bringt, so bilden sich, obschon die Flasche nicht eigentlich entladen wird, doch ähnliche Figuren, wie die früher beschriebenen Lichtenberg'schen, aus deren Gestalt sich dann auf die Richtung des Stromes schließen läßt. Der Nebenstrom



Digitized by Google

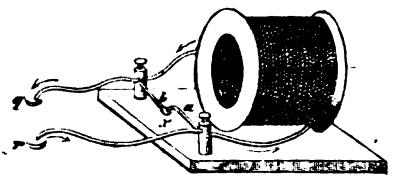
giebt nun ganz ähnliche Figuren wie der Hauptſtrom und zeigt daher auch mit dieſem gleiche Richtung. Die Stärke des Nebenſtromes beſtimmte Rieß aus der Erwärmung eines in ein Luftthermometer eingeſchloſſenen Platindrahtes. Er fand, daß die Elektricitätsmenge im Nebendrahte derjenigen im Hauptdrahte und der wirkſamen Länge des letzteren direct und der Entfernung beider umgekehrt proportional iſt. Der Nebenſtrom circulirt in einer der Dauer der Hauptentladung proportionirten Zeit, wirkt aber auf die Entladung im Hauptdrahte zurück, und zwar dergeſtalt, daß er nicht die entladene Elektricitätsmenge, ſondern nur die Dauer der Entladung in dem Verhältniß verzögert, in welchem das Leitungsvermögen des Nebendrahtes ſchwächer als das des Hauptdrahtes iſt. Weil die Entladung der Flaſche oder Batterie im Grunde nur eine Folge partieller Entladungen iſt, ſo erzeugt jede der letzteren ihren eigenen Nebenſtrom, welcher auf den Hauptſtrom zurückwirkt und die nächſte partielle Entladung verzögert. Bringt man zwiſchen beide Drähte einen Nichtleiter, ſo erleidet dadurch der Nebenſtrom keine merkliche Schwächung; befinden ſich dagegen zwei Nebendrähte in der Nähe des Hauptdrahtes, ſo iſt der inducirte Strom in jedem ſchwächer, als wenn nur der eine vorhanden wäre. Ueberhaupt wird der Nebenſtrom durch jeden Körper geſchwächt, in dem gleichfalls ein elektriſcher Strom hervortreten kann.

Dieſe Geſetze gelten größtentheils auch für die durch die Entladung einer Volta'ſchen Kette inducirten Ströme.

228. Weiter hat Faraday gezeigt, daß der elektriſche Strom auch in dem Schließungsdrahte einer Kette auf die Theilchen deſſelben eine ähnliche Wirkung wie auf einen benachbarten Leiter hervorbringt, indem ſich in jenem Drahte bei der Unterbrechung des Hauptſtromes ein inducirter Strom nach gleicher Richtung zeigt. Faraday nennt dieſen Strom den Extraſtrom, durch welchen der urſprüngliche Strom ſich ſelbſt in ſeiner Wirkung verſtärkt. Hieraus erklärt es ſich auch, daß man ſchon mit einer einfachen Kette, welche für ſich nur einen ſehr ſchwachen Schlag giebt, eine bedeutende phyſiologiſche Wirkung hervorbringen kann, wenn man ſie mit einem langen Schließungsdrahte verſieht, deſſen Enden man beim Oeffnen der Kette in die Hand nimmt. Die Intenſität dieſer Wirkung wird noch erhöht, wenn man den langen Schließungsdraht zu einer Spirale aufwindet, weil dann beim Oeffnen der Kette mit dem Verſchwinden des elektriſchen Stromes aus jeder einzelnen Windung ein Strom in der benachbarten Windung inducirt wird. Beim Schließen der Kette hat der Extraſtrom eine dem Hauptſtrome entgegengeſetzte Richtung,

Digitized by Google

weshalb der Schlag in diesem Falle unbeträchtlich ist. Faraday hat die Wirkung des Extrastromes auf folgende Weise nachzuweisen gesucht. Um eine Spule von Holz ist ein etwa 400 Fuß langer und



½ Linie dicker Kupferdraht aufgewunden, dessen Enden in die Quecksilbernäpfchen p und q tauchen, welche mit den Polen einer Kette in Verbindung gesetzt werden. Außerdem sieht man noch zwei Querdrähte a und b, welche an den langen Draht gelöthet sind. Der Strom geht nun in der Richtung der Pfeile theils durch die Drahtspirale, theils auch durch die Drähte a, b nach q. Da nun der größere Theil des Stromes durch die letzterwähnten Drähte geht, falls sie sich berühren, so entsteht nur ein schwacher Funken, wenn man die Kette bei p öffnet. Werden aber die Drähte a, b bei x ein wenig von einander getrennt, so giebt sich der beim Oeffnen der Kette in der Spirale erzeugte Extrastrom als ein Funken zu erkennen, welcher von b nach a überspringt. Diese Richtung zeigt ein eingeschalteter Multiplicator oder auch ein mit Jodkalium befeuchtetes Papierblättchen, welches bei x zwischen die beiden Drähte gelegt wird. Das Kalium tritt an b, das Jod an a aus. Befestigt man an die Enden der Drähte Handhaben, welche man mit befeuchteten Händen anfaßt, so erhält man beim Oeffnen der Kette einen kräftigen Schlag.

Dove hat sich bemüht, auch den durch das Entladen einer Leidner Flasche entstehenden Extrastrom vermittelst einer platten Drahtspirale, deren Windungen in Holz eingelassen waren, und zweier daran gelötheter Drähte mit Handhaben nachzuweisen.

229. Wir haben gesehen, daß der elektrische Strom unter Umständen Magnetismus hervorrufen kann. Umgekehrt hat nun auch der Magnet die Eigenschaft, in einem geschlossenen Leiter das elektrische Gleichgewicht aufzuheben und dadurch einen Strom zu erzeugen, was Faraday zuerst durch entscheidende Versuche gezeigt hat. Man denke sich um einen hohlen Cylinder von Holz oder Pappe, welcher etwa 2—3 Zoll weit ist, einen mit Seide übersponnenen Kupferdraht nach einerlei Richtung gewunden, so daß ungefähr 600 bis 800 Windungen neben und übereinander zu liegen kommen, und die beiden mehrere Fuß weit fortgeführten Drahtenden mit den Enden eines Multiplicatordrahtes verbunden. Wenn man nun in die Höhlung des Cylinders den Pol eines kräftigen Magneten schnell hineinschiebt, so zeigt die Multiplicatornadel in der Drahtspirale einen Strom

Digitized by Google

an, welcher aber bald wieder verschwindet, wenn man den Stab ruhig in der Höhlung liegen läßt. Nimmt man dagegen den Stab wieder aus der Drahtspirale heraus, so weicht die Nadel nach der entgegengesetzten Seite aus und verräth mithin einen Strom, dessen Richtung der des vorigen entgegengesetzt ist. Hieraus kann man schließen, daß der angenäherte Magnet durch seine Einwirkung auf die Massentheilchen des Drahtes das elektrische Gleichgewicht in demselben aufhebt und dadurch einen Strom nach einer bestimmten Richtung veranlaßt. Dieser Strom wird unmerklich, sobald die Elemente des Elektricums in einen neuen Gleichgewichtszustand gekommen sind. Wird aber der magnetische Einfluß entfernt, so kehren die Elemente des Elektricums in ihre vorige Gleichgewichtslage zurück, was die Entstehung eines Stromes zur Folge hat, der seiner Richtung nach dem vorigen entgegengesetzt sein muß. Man sieht, daß hier Aehnliches stattfindet, wie bei der Annäherung eines von Elektricität durchströmten Leiters an einen anderen geschlossenen Leiter, wo in dem letzteren durch die vertheilende Wirkung des ersteren ebenfalls ein Strom entsteht, welcher sich in den entgegengesetzten verwandelt, wenn der erste Leiter von dem zweiten entfernt wird.

Das Gesetz, nach welchem sich die Stärke des durch den Magnetismus inducirten Stromes richtet, hat Lenz genauer untersucht. Er fand, daß die elektromotorische Kraft der Spirale der Summe der elektromotorischen Kräfte der einzelnen Windungen gleich und daher der Anzahl der Windungen proportional ist. Die Dicke des Drahtes ist ohne Einfluß, nicht aber ganz und gar die Weite der Windungen, indem die engeren im Allgemeinen etwas wirksamer als die weiteren sind.

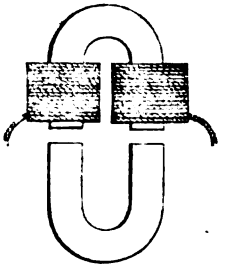
230. Es versteht sich wohl von selbst, daß die Störung des elektrischen Gleichgewichtes in einem Drahte auch durch einen Elektromagneten bewirkt werden kann, da ein solcher sich wenig von einem gewöhnlichen Magneten unterscheidet. Um dies zu zeigen, kann man sich eines sehr einfachen Apparates, des sogenannten magneto-elektrischen Ringes bedienen. Derselbe besteht aus einem Ringe von weichem Eisen, dessen Durchmesser 3 Zoll beträgt und dessen beide Hälften mit mehreren Schichten von übersponnenem Kupferdrahte umwickelt sind, in der Art, daß zwischen den Drahtwindungen der einen und der anderen Hälfte ein ½ Zoll breiter Zwischenraum am Eisenringe frei bleibt. Werden nun die Enden des Drahtes, welcher um die eine Hälfte des Ringes gewunden ist, mit den Polen einer galvanischen Kette verbunden, so wird diese Hälfte zu einem Elektromagneten, durch

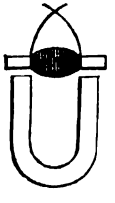
Digitized by Google

den die zweite Hälfte gleichfalls magnetisch wird, so daß dieselbe in der ihr entsprechenden Drahtumwickelung einen Strom erregt, der sogleich wahrnehmbar wird, wenn man die Enden des um diese Hälfte gewundenen Drahtes mit den Enden eines Multiplicators verbunden hat.

Legt man in die im vorigen §. erwähnte Drahtspirale einen unmagnetischen Eisenstab, und ertheilt man ihm durch Berührung mit dem Pole eines Magneten Polarität, so treten ebenfalls die beschriebenen Erscheinungen ein.

Ein sehr langer mit Seide übersponnener Kupferdraht werde, wie die Figur zeigt, um die beiden Schenkel eines hufeisenförmigen Stabes von weichem Eisen gewickelt. Wenn man nun, während die Drahtenden in hinreichender Entfernung vom Eisen mit einander verbunden sind, einen starken Hufeisenmagnet den Schenkeln des umwickelten Eisens nähert, so wird ein gewöhnlicher Magnet, der sich über oder unter den fortgeführten Drahtstücken befindet, durch den vom Magneten erregten Strom abgelenkt. Bei der Entfernung des Hufeisenmagneten zeigt auch dieser Strom die entgegengesetzte Richtung. Faßt man die beiden Drahtenden mit den Händen an, so erhält man bei der Annäherung und Entfernung des Hufeisenmagneten einen Schlag. Werden die beiden Drahtenden in kleiner Entfernung einander gegenüber gehalten, so sieht man unter den nämlichen Umständen einen lebhaften Funken überspringen. Um einen Funken hervorzubringen, kann man auch den Anker eines ziemlich starken Hufeisenmagneten mit einem langen, 1/4 Linie dicken Kupferdraht umwinden und die Drahtenden, wie die Figur andeutet, mit einander in Berührung bringen. Setzt man nun den Anker rasch an die Polflächen des Magneten an oder reißt man ihn schnell davon ab, so fahren die Drähte bei dieser Bewegung etwas aus einander und man sieht einen Funken überspringen.





Auch durch den Erdmagnetismus können unter den gehörigen Umständen elektrische Ströme erweckt werden. Steckt man nämlich in die Höhlung einer Drahtspirale statt eines Magneten einen Stab von weichem Eisen, so entsteht in dem mit der Spirale verbundenen Multiplicator eine Ablenkung der Nadel, wenn die Spirale mit dem Stabe in die Richtung einer Inclinationsnadel

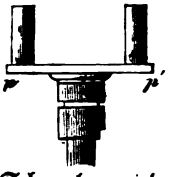
Digitized by Google

gehalten und wieder daraus entfernt wird. Die Ablenkung kann noch bedeutend verstärkt werden, wenn man die Spirale mit dem Stabe schwingend auf- und abbewegt, so daß das eine Ende des Stabes in der Inclinationsebene abwechselnd nach oben und nach unten gerichtet ist. Der Erdmagnetismus kann auch unmittelbar ohne Anwendung eines Stabes aus weichem Eisen einen elektrischen Strom induciren, wenn man die Spirale in die Richtung der Inclinationsnadel hält und dann schnell umkehrt, um sie in die entgegengesetzte Stellung zu bringen.

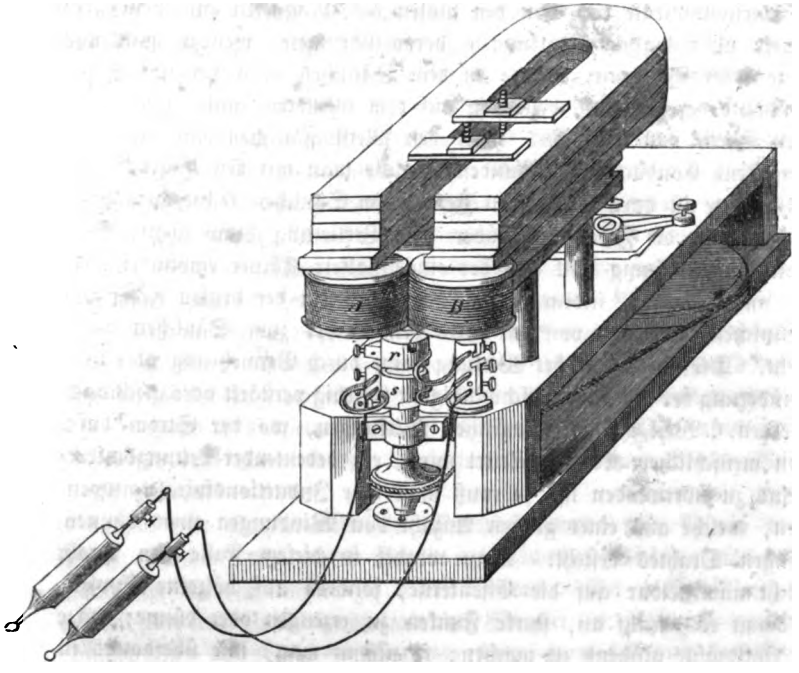
Wenn man einen kupfernen Ring, in dessen Centrum eine Bouffole befestigt ist, um eine horizontale, im magnetischen Meridiane befindliche Are dergestalt dreht, daß sein oberer Theil sich von Ost nach West bewegt, so wird in ihm durch den verticalen Theil der erdmagnetischen Kraft ein Strom inducirt, welcher den Nordpol der Nadel nach Ost ablenkt. Giebt man aber der Are eine verticale Stellung, so wird die Nadel der Bouffole bei der Drehung des Kupferringes durch den horizontalen Antheil des Erdmagnetismus abgelenkt. Da nun die Tangenten der Ablenkung den ablenkenden Kräften proportional sind, so verhalten sich auch die Tangenten der Inclination wie die Tangenten der beiden angeführten Ablenkungen. Hierauf beruht Weber's sogenanntes Inductions-Inclinatorium, ein Instrument, welches sehr bequem ist, um die Inclination eines Ortes mit der schon bekannten eines anderen Ortes zu vergleichen. Denn es ist nur nöthig, daß man an beiden Orten die Ablenkung der Nadel beobachtet, welche der im Kupferringe inducirte Strom bei derselben Anzahl von Umdrehungen in einer Minute hervorbringt. Die Tangenten dieser Ablenkungen verhalten sich nach dem Obigen wie die Tangenten der Inclination an den beiden betreffenden Orten. Da nun die Inclination des einen Ortes bekannt ist, so ergiebt sich aus dieser Proportion leicht die unbekannte Inclination des anderen Ortes.

231. Um durch den Magnetismus kräftige elektrische Ströme auf eine bequeme Weise hervorbringen zu können, hat man besondere, sogenannte magnetoelektrische Rotationsapparate. Die Figur auf der folgenden Seite stellt eine solche von Ettingshausen construirte Maschine vor. Unter den Polen eines zusammengesetzten Hufeisenmagneten können zwei Drahtspiralen, welche um zwei Eisencylinder gewunden sind, mittelst eines Schnurlaufes um eine eiserne Are gedreht werden. Die letztere trägt nämlich eine Eisenplatte pp', auf welcher in gleichen Abständen von der Mitte zwei Cylinder aus weichem Eisen stehen, um welche ein mit Seide über-

Digitized by Google



ſponnener Kupferdraht in entgegengeſetzten Richtungen gewunden iſt. Indem nun dieſe beiden Eiſencylinder unter den Polen des Hufeiſenmagneten hinweggehen, werden ſie magnetiſch und zwar jeder Cylinder abwechſelnd nord- und ſüdpolar. Das eine Ende des aufgewundenen Drahtes iſt durch eine Schraube an dem eiſernen Ringe r befeſtigt, welcher von der eiſernen Umdrehungsaxe durch einen Holzring getrennt iſt; das andere Drahtende iſt dagegen auf der eiſernen Platte aufgeſchraubt, welche die



beiden Eiſenkerne der Drahtſpirale trägt. Mit dieſem Drahtende iſt nun auch der Eiſencylinder s, welcher unterhalb r unmittelbar an die eiſerne Umdrehungsaxe befeſtigt iſt, in leitender Verbindung. Werden demnach r und s in Verbindung geſetzt, ſo iſt die Inductionsſpirale AB geſchloſſen und der Strom circulirt in ihren Windungen, wenn das Syſtem gedreht wird. An dem unteren Rande des Cylinders s iſt ein Ausſchnitt angebracht, welcher die Hälfte des Umfanges hinwegnimmt; an ſeinem oberen Rande befinden ſich aber

Digitized by Google

zwei grubenartige Vertiefungen einander gerade gegenüber. Auf beiden Seiten der Umdrehungsaxe steht ein messingenes Säulchen, welches mit Löchern und Klemmschrauben versehen ist, um Metallfedern aufnehmen zu können. So sieht man an dem Säulchen rechts zwei Federn, von denen die obere während der Rotation des Systems beständig auf dem Eisenringe r schleift, die andere aber auf dem oberen Theile des Cylinders s. Hierdurch ist die Kette geschlossen, der Strom circulirt in den Windungen der Spirale, wird aber so oft unterbrochen, als die Enden der Feder über die grubenartigen Vertiefungen hinweggleiten, was jedesmal der Fall ist, wenn die Eisenkerne der Inductionsspirale sich von den Polen des Magneten entfernen. Um starke physiologische Wirkungen hervorzubringen, wendet man noch eine dritte Feder an, welche an dem Säulchen links befestigt ist und während der Rotation beständig auf dem mittleren, nicht unterbrochenen Theile von s schleift. Mit den Messingsäulchen sind nun zwei metallene Conductoren verbunden, welche man mit den Händen faßt. Die Kette ist durch die beiden Federn am Säulchen rechts geschlossen, sobald aber die Feder an s über eine Vertiefung hinweggeht, findet eine Unterbrechung statt und der eingeschaltete Körper empfindet einen Trennungsschlag, indem der Strom vermittelst der dritten Feder zum Säulchen links und von da durch den Körper zum Säulchen rechts geht. Die Intensität der Wirkung kann durch Vermehrung oder Verminderung der Rotationsgeschwindigkeit beliebig verstärkt oder geschwächt werden. Weil bei physiologischen Wirkungen, wo der Strom durch den menschlichen Körper geleitet wird, ein bedeutender Leitungswiderstand zu überwinden ist, so muß man eine Inductionsspirale anwenden, welche aus einer großen Anzahl von Windungen eines dünnen, langen Drahtes besteht. Man windet in diesem Falle den Draht nicht unmittelbar auf die Eisenkerne, sondern auf hölzerne Spulen. Kommt es darauf an, starke Funken zu erzeugen oder dünne, kurze Metalldrähte glühend zu machen, so nimmt man, wie überhaupt in allen Fällen, wo ein geringer Leitungswiderstand zu überwinden ist, einen dicken Draht, den man in wenigen Windungen unmittelbar auf den Eisenkern wickelt.

Will man durch den inducirten Strom chemische Zersetzungen hervorbringen, so gebraucht man gleichfalls die Inductionsspirale mit dem langen, dünnen Drahte. In diesem Falle setzt man den Ring r mit dem Säulchen rechts und s mit dem Säulchen links in Verbindung. Führt man nun von den beiden Säulchen Drähte in die zu zersetzende Flüssigkeit, so ist die Kette durch die letztere geschlossen und alsbald

Digitized by Google

beginnt die Zerlegung durch den Strom. Weil dieser aber beständig seine Richtung ändert, so ist eine Vorrichtung zweckmäßig, welche bewirkt, daß er immer in derselben Richtung durch die Flüssigkeit geht. Zu diesem Behufe bringt man die Feder am Säulchen links mit dem unteren Rande von s in Berührung; sie ist dann nur während der ersten Hälfte der Umdrehung mit dem Cylinder s in Verbindung, da die letztere wegen des folgenden halben Umlaufes der Inductionsspirale durch den Ausschnitt unterbrochen ist. Auf diese Weise circulirt immer derselbe Strom durch die Flüssigkeit, weil der entgegengesetzt gerichtete in Folge der Unterbrechung nicht zu Stande kommen kann. Soll der Inductionsstrom magnetische Wirkungen hervorbringen, so giebt man ihm auf die eben gezeigte Weise stets dieselbe Richtung und gebraucht überdies die Inductionsspirale mit dem dicken Drahte.

Verbindet man die Drahtenden eines Multiplicators unmittelbar mit den Enden der Inductionsspirale, ohne den entstehenden Strom durch Unterbrechung auf einerlei Richtung zurückzuführen, so erfolgt, wie Poggendorff zuerst wahrgenommen hat, gegen die Erwartung eine Ablenkung der Multiplicatornadel; denn da entgegengesetzte Ströme von gleicher Stärke in schneller Abwechselung auf einander folgen, so sollte man meinen, ihre Wirkungen auf die Nadel müßten sich gegenseitig aufheben. Weniger auffallend wird diese Erscheinung, wenn man die Erfahrung berücksichtigt, daß die Nadel insgemein nach derjenigen Seite aus ihrer Richtung abgelenkt wird, nach welcher sie schon vor dem Eintritte der inducirten Ströme einen kleinen Ausschlag hatte.

Die erste magnetoelektrische Maschine wurde von Pixii construirt, welcher dann durch Sarton, Klarke, Störer, ꝛc. bald mancherlei Verbesserungen zu Theil wurden. Bei dieser Maschine wurde statt der Inductionsspirale der Magnet in Rotation versetzt. Anstatt eines gewöhnlichen Magneten kann man sich auch mit Vortheil eines kräftigen Elektromagneten bedienen, welcher durch eine einfache galvanische Kette hervorgebracht wird und dessen Pole durch die Umkehrung des Stromes einen raschen Wechsel erfahren können.

232. Aus der Induction elektrischer Ströme durch den Magnetismus folgt, daß auch die Nadel eines Multiplicators, wenn sie aus ihrer Ruhelage heraus oder in dieselbe zurücktritt, in dem umgebenden Drahte einen elektrischen Strom erzeugt, der auf sie selbst zurückwirken muß. Es seien zwei Magnetnadeln, von denen jede mit einem Drahtgewinde umgeben ist, in einer hinreichenden Entfernung von einander

Digitized by Google

aufgestellt, so daß keine auf die andere unmittelbar einwirken kann. Wird nun die eine dieser Nadeln bewegt, so geräth auch die andere in eine Bewegung, falls die beiden Drahtgewinde leitend mit einander verbunden sind. Durch die Bewegung der ersten Nadel entsteht nämlich in dem umgebenden Drahtgewinde ein Strom, in Folge dessen auch die andere Nadel eine Ablenkung erfährt. Denkt man sich ein Drahtgewinde mit einer ganzen Reihe von Multiplicatoren in Verbindung, so gerathen in den letzteren alle Nadeln augenblicklich in Bewegung, wenn man in das Drahtgewinde einen starken Magnetstab schiebt. Man erkennt leicht, daß derartige inducirte Ströme für die elektrische Telegraphie von Bedeutung sein müssen. Deshalb hat auch Gauß schon lange statt der galvanischen Elektricität magnetoelektrische Ströme vorgeschlagen, welche sich jederzeit in unveränderter Stärke erhalten lassen. Von Steinheil ist dieser Vorschlag auch zur Wirklichkeit gebracht worden.

233. Die Elektricitätserregung durch Magnetismus gewährt ein einfaches Mittel, um die durch einen elektrischen Strom bewirkte Induction zu verstärken. In den §§. 226 und 228 haben wir gesehen, wie ein solcher Inductionsstrom verstärkt werden kann, wenn man den betreffenden Draht zu einer Spirale aufwindet. Steckt man nun in die letztere einen Stab aus weichem Eisen, so erlangt dadurch der inducirte Strom eine abermalige Verstärkung, weil das Eisen durch den umlaufenden Strom magnetische Polarität annimmt, deren Aufhören bei der Unterbrechung des Hauptstromes im Drahte einen Strom veranlaßt, welcher gleiche Richtung mit dem inducirten hat. Noch bedeutender ist die Verstärkung des letzteren, wenn man statt des Eisenstabes ein Bündel von Eisendrähten in die Spirale bringt, namentlich wenn die einzelnen Drähte durch Ueberspinnen mit Seide wohl von einander isolirt sind. Um diese Erscheinung aufzuhellen, steckte Magnus das Drahtbündel in einen dünnen Cylinder aus Eisenblech und fand, daß dadurch die Wirkung fast ganz herabgesetzt wurde. In diesem Falle wurde nämlich durch das Verschwinden des Magnetismus ein Strom in dem Blechcylinder inducirt, weshalb auf die Drahtspirale selbst eine weit geringere Wirkung stattfinden mußte. Dies bestätigte sich dadurch, daß die verstärkte Wirkung wieder eintrat, als der Cylinder aufgeschlitzt wurde. Außerdem wird aber auch durch den in dem geschlossenen Blechcylinder inducirten Strom neuer Magnetismus erweckt, welcher die inducirende Wirkung des verschwindenden Magnetismus vermindert. Aehnlich nun wie ein von dem Blechcylinder umschlossenes Drahtbündel verhält sich ein massiver Eisen-

Digitized by Google

cylinder, da auch in ihm ein Strom inducirt werden kann. In dem angegebenen Drahtbündel ist dagegen ein solcher Strom nicht wohl möglich, er kann nur in dem Leitungsdrahte selbst entstehen und wird somit die Intensität des anfänglich inducirten Stromes erhöhen. Nach Dove's Untersuchungen wird die Wirkung solcher Drahtbündel durch einen umschließenden Metallcylinder um so mehr herabgesetzt, je besser dieser leitet. Die Menge der in Bewegung gesetzten Elektricität wird durch ihn nicht vermindert, wohl aber ihre Geschwindigkeit verzögert. —

Wenn sich eine Magnetnadel in einem geschlossenen Drahtgewinde befindet, so nehmen ihre Windungen viel rascher an Größe ab als wenn das Gewinde offen ist; denn in jenem Falle wird durch jede Bewegung der Nadel ein Strom erregt, welcher sie nach einer ihrer Bewegung entgegengesetzten Richtung abzulenken strebt.

234. Wenn man eine Kupferscheibe unterhalb einer frei beweglichen Magnetnadel in Rotation um eine verticale Axe versetzt, so erleidet die Nadel in der Richtung dieser Bewegung eine Ablenkung und geräth endlich selbst in eine rotirende Bewegung. Um Luftströmungen abzuhalten, kann man die Nadel innerhalb einer Glasglocke, welche unten durch ein Papierblatt geschlossen ist, an einem Seidenfaden aufhängen. Beim Beginn der Rotation wird die Nadel um einen Winkel abgelenkt, dessen Größe durch die Geschwindigkeit der Umdrehung und durch den Erdmagnetismus, welcher die Nadel in den magnetischen Meridian zurückzuführen strebt, bestimmt ist. In dieser Lage verharrt die Nadel, falls die Umdrehung mit constanter Geschwindigkeit fortgesetzt wird. Dreht man aber schneller, so nimmt auch die Ablenkung zu, bis endlich die Nadel selbst zu rotiren anfängt, sobald die Geschwindigkeit eine gewisse Grenze überschritten hat. Diese Erscheinung wurde von Arago zuerst wahrgenommen, welcher die Kupferscheibe bei einem hierzu construirten Apparate durch ein Uhrwerk in Bewegung setzen ließ. Umgekehrt wird auch eine beweglich aufgehängte Kupferscheibe durch einen unter ihr rotirenden Magnetstab in eine drehende Bewegung versetzt.

Die Intensität der Wirkung ist um so größer, je näher der Magnet und die Kupferscheibe einander sind, je größer die Masse der letzteren und je stärker der Magnetismus der Nadel ist. Jedoch ist ein gewisses Größenverhältniß zwischen dem Magneten und der Scheibe nothwendig. Ist die Masse der Scheibe unterbrochen, hat sie z. B. in der Richtung ihrer Radien Einschnitte, so geht ein bedeutender Theil ihres Einflusses auf die Nadel verloren, tritt aber wieder her-

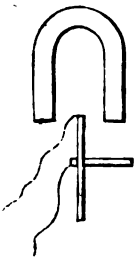
Digitized by Google

vor, wenn man die Zwischenräume ausfüllt, was selbst durch ein anderes Metall geschehen kann. Dagegen stellt sich die volle Wirkung nicht wieder ein, wenn man die Einschnitte durch kein zusammenhängendes Metall, sondern durch stark zusammengepreßtes Metallpulver oder durch eine Flüssigkeit ausfüllt. Werden zwischen den Magneten und die Kupferscheibe andere Körper gebracht, so schwächen sie die Wirkung, wenn sie selbst eine ähnliche beim Rotiren hervorzubringen vermögen. Eisen hebt die Wirkung in dieser Art ganz auf, weniger Kupfer, andere Körper aber, wie Glas, Holz, u. dgl. lassen sie unvermindert hindurch.

235. Die Ablenkung und Rotation der Nadel kann nur von einer Kraft herrühren, welche nach der Tangente der Scheibe wirkt. Außer dieser giebt es aber noch zwei andere Kräfte, welche gleichfalls von der Scheibe ausgehen und von der die eine senkrecht auf ihrer Ebene, die andere aber damit parallel ist. Die erste von diesen beiden Kräften wirkt abstoßend auf jeden Pol eines Magneten, wie man sogleich erkennt, wenn man an einen Wagebalken einen Magnetstab vertical befestigt und unter ihm eine Scheibe rotiren läßt. Die zweite Kraft wirkt in der Richtung des Halbmessers der Scheibe und zwar in der Nähe des äußeren Umfanges abstoßend, aber immer weniger, je mehr man sich dem Mittelpunkte der Scheibe nähert. Bringt man nämlich eine Inclinationsnadel so über die Scheibe, daß sie eine verticale Richtung annimmt, so wird sie bei der Rotation der Scheibe in der Nähe des Randes vom Centrum gegen die Peripherie hin abgestoßen; nähert man sie aber allmälig dem Centrum der Scheibe, so wird die Abstoßung immer geringer, so daß sie an einer bestimmten Stelle zwischen Centrum und Peripherie gleich 0 wird, indem die Nadel hier eine vollkommen verticale Stellung annimmt. Noch weiter gegen das Centrum hin erleidet sie eine Anziehung, in Folge deren sie sich nach jenem hinbewegt. Im Centrum selbst ist endlich diese Kraft wieder gleich Null.

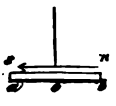
Die beschriebenen Erscheinungen sind eine Folge der inducirenden Wirkung des Magneten, indem nämlich der letztere in der rotirenden Scheibe Ströme inducirt, welche auf ihn selbst zurückwirken. Durch Faraday ist die Existenz dieser Ströme wirklich nachgewiesen worden. Man bringt eine Kupferscheibe, welche um eine horizontale Axe drehbar ist, so zwischen die Pole eines Hufeisenmagneten, daß ihr oberer Rand entweder in die Ebene der beiden Pole oder noch etwas darunter fällt. Das eine Drahtende eines Multiplicators bringt man nun mit dem amalgamirten Rande, das andere aber mit der Axe

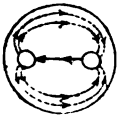
Digitized by Google



der Scheibe in leitende Verbindung. Wird dann die Scheibe gedreht, so erhält die Nadel des Multiplicators eine Ablenkung, deren Richtung von der Richtung der Rotation abhängt. Auch weicht die Nadel nach der entgegengesetzten Richtung aus, wenn man die Pole des Magneten, ohne sonst etwas zu verändern, verwechselt. Die angezeigten Ströme bewegen sich in der Richtung des Radius der Scheibe und zwar je nach der Umdrehungsrichtung entweder von der Peripherie gegen das Centrum oder im umgekehrten Sinne. Läßt man nur den einen Pol eines Magneten auf die Scheibe wirken, so sind die Erscheinungen im Wesentlichen dieselben und nur der Intensität nach verschieden. Befindet sich z. B. der Nordpol eines Magneten über einer horizontalen Scheibe, welche sich schraubenrecht dreht, so zeigt die Ablenkung der Multiplicatornadel einen Strom an, der vom Centrum der Scheibe nach dem Umkreise derselben geht. Wenn man die Verbindung der Scheibe mit dem Multiplicator aufhebt, so versteht sich von selbst,

daß diese Ströme in der Scheibe selbst ihren Umlauf halten müssen, wie die nebenstehende Figur zeigt, wo der Strom vom Centrum am Magnetpole vorbei zum Umkreise geht, um in dem dem Magnetpole gegenüber liegenden Theile der Scheibe zurückzukehren. Wenn man über einer horizontalen, nach rechts rotirenden Kupferscheibe eine horizontale Magnetnadel aufhängt, so erregt der eine Pol n einen Strom, welcher von dem Centrum c nach der Peripherie b geht, der Pol s aber einen solchen, welcher von der Peripherie a nach c geht. Daher





entsteht aus der vereinigten Wirkung beider Pole ein Strom, der von a nach b gerichtet ist. Diese Ströme werden daher in der Scheibe einen Lauf haben, wie Fig. 2 zeigt. Durch solche Ströme wird die Kraft vermittelt, welche die tangentiale Ablenkung der Nadel zur Folge hat.

Scheiben von anderen Metallen zeigen dieselben Wirkungen, nur sehr verschieden an Stärke, wie Herschel und Babbage durch genaue Versuche gezeigt haben. Bei Silber tritt die Wirkung stark hervor, jedoch am stärksten beim Eisen, bei den sonstigen Metallen aber schwächer als beim Kupfer. Obschon die erwähnten Erscheinungen aller Wahrscheinlichkeit nach Wirkungen inducirter Ströme sind, so scheint doch bei einer Scheibe aus Eisen die gewöhnliche magne-

Digitized by Google

tische Vertheilung, welche von den Polen des in der Nähe befindlichen Magneten ausgeht, nicht ganz ohne Einfluß zu sein. Nach Faraday heben sich beim Eisen und den wenigen anderen Körpern, welche des eigentlichen Magnetismus fähig sind, ungleichnamige Magnetpole, die an den entgegengesetzten Seiten einer bewegten Scheibe aufgestellt werden, einander in ihrer Wirkung auf, während durch die gleichnamigen Pole die Wirkung verstärkt wird. Hierdurch wäre ein Mittel gegeben, um zu erfahren, ob die Wirkung vorzugsweise durch elektrische Ströme vermittelt oder ob sie mehr durch die gewöhnliche magnetische Vertheilung bedingt ist. —

Aus den vorhergehenden Betrachtungen erklärt sich einfach, warum eine Magnetnadel, die über einer Kupferscheibe oscillirt, viel schneller als sonst zur Ruhe kommt. Es werden nämlich durch die oscillirende Nadel in der Scheibe Ströme inducirt, welche auf die Nadel hemmend zurückwirken, wenn die Scheibe ihren Bewegungen nicht nachfolgen kann. Gauß machte hiervon eine Anwendung, um die Schwingungen des Magnetstabes im Magnetometer zu dämpfen. Uebrigens muß man, um hinsichtlich der von der Induction herrührenden Abnahme der Schwingungen ein reines Resultat zu erhalten, die durch den Luftwiderstand bewirkte Verminderung des Schwingungsbogens davon abziehen.

236. Auch durch die Rotation eines Magneten um seine eigene Axe entstehen elektrische Ströme, welche ein Galvanometer zu erkennen giebt, wenn man das eine Ende des Magneten und eine Stelle zwischen seinen Polen mit den Drahtenden des Multiplicators in Verbindung bringt. Nach Weber läßt sich diese von Faraday entdeckte Erscheinung eben so wenig nach der Ampère'schen Theorie erklären wie die früher betrachtete von der Rotation eines Magneten um seine eigene Axe, wenn durch die eine Hälfte desselben ein elektrischer Strom geleitet wird. Weber nennt die Erzeugung der obigen Ströme die unipolare Induction. Denkt man sich nämlich einen Magnetstab gegen einen geschlossenen metallischen Ring so bewegt, daß jeder Pol des Magneten eine in sich zurückkehrende Bahn beschreibt und zwar so, daß der eine Pol die Ringebene durchschneidet, während die Bahn des anderen Poles ganz außerhalb des Ringes bleibt, was freilich nur möglich ist, wenn der Magnetstab den Ring durchschneiden kann, ohne die metallische Schließung desselben aufzuheben; so erregt der durch die Ringebene gehende Pol während seiner ganzen Bewegung in dem Ringe einen Strom von stets einerlei Richtung, der andere Pol aber zwei auf einander folgende Ströme von ent-

Digitized by Google

gegengesetzten Richtungen, welche in ihren Wirkungen sich aufheben. Es ist also gerade so, als ob nur der eine, der durch den Ring gehende Pol gewirkt hätte. Nach Weber bildet nun der Multiplicatordraht mit jeder Linie, die man sich im Innern des Magneten zwischen den Berührungspunkten des letzteren mit den Drahtenden des Multiplicators denken kann, einen solchen Ring, in welchem durch magnetische Elemente, die nur der einen Hälfte nach hindurchgehen, ein Strom in stets einerlei Richtung erzeugt wird. Weber sieht hierin einen Beweis, daß man sich magnetische Elemente mit getrennten Polen denken müsse. Diese Pole werden nach der gewöhnlichen Ansicht über das Wesen des Magnetismus von besonderen, räumlich geschiedenen Flüssigkeiten gebildet, während nach unserer Ansicht, welche die Annahme solcher Flüssigkeiten für überflüssig erachtet, die entgegengesetzten Bestandtheile der Massentheilchen des Eisens selbst diese Pole darstellen.

Aus den in diesem Kapitel angeführten Erscheinungen folgt, daß beinahe keine Bewegung eines Magneten gegen die umgebenden Leiter erfolgen kann, ohne daß in den letzteren elektrische Ströme entstehen, welche auf jene Bewegung hemmend zurückwirken. Aus diesem Grunde fällt der mechanische Effect elektromagnetischer Rotationsapparate meist geringer aus, als man nach der Stärke des erregten Magnetismus erwarten sollte.

Siebentes Kapitel.

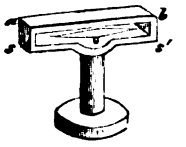
Von der Thermoelektricität. Thermomagnetismus.

237. Die strömende Elektricität erzeugt Wärme; umgekehrt kann auch die Wärme elektrische Ströme hervorbringen. Wir wissen, daß in Nichtleitern durch Temperaturwechsel eine elektrische Spannung wach werden kann. Außer dem Turmalin, den wir wegen seines merkwürdigen Verhaltens in dieser Hinsicht schon angeführt haben, giebt es noch viele Krystalle, die Aehnliches zeigen. Der Topas z. B. wird nach Erman durch Temperaturwechsel an den Seitenflächen negativ, an den Endflächen positiv elektrisch; der Borazit ist nach Hankel bald positiv, bald negativ elektrisch, je nachdem sich die Temperatur ändert. In Leitern, welche der Elektricität freie Bewegung gestatten, entsteht nun durch Temperaturveränderung ein Strom und die damit verbundene, eigenthümliche magnetische Polarität.

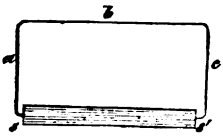
Am auffallendsten zeigt sich dies, wenn man zwei verschieden-

Digitized by Google

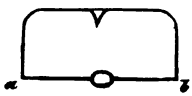
artige Metallstäbe so zusammenlöthet, daß sie eine geschlossene Kette bilden, und den Löthstellen verschiedene Temperaturen giebt. Man löthe z. B. an die Enden eines Stäbchens ss′ aus Wismuth oder Antimon einen rechtwinkelig gebogenen Kupferstreifen ab. Stellt man nun das so gebildete Rechteck in den magnetischen Meridian und erhitzt die Löthstelle s, so wird die Magnetnadel, welche bisher mit der Längenrichtung des Stäbchens parallel war, um einen bestimmten Winkel abgelenkt. Erwärmt man dagegen die Löthstelle s′, so findet die Ablenkung nach entgegengesetzter Richtung statt. Diese Erscheinungen wurden von Seebeck entdeckt. Eine thermomagnetische Kette kann man auch ganz einfach bilden,



wenn man ein Stäbchen ss′ von Antimon oder Wismuth mit einem Kupferdrahte abc zusammenlöthet. Erhitzt man eine der beiden Löthstellen s oder s′, während b über eine Magnetnadel gehalten wird, so beobachtet man eine Ablenkung der letzteren.



Eine solche Kette läßt sich auch unter der Einwirkung des Magnetismus in Rotation versetzen. Man habe eine Kette, welche aus einem gebogenen Silberdraht und einem Platindrahte zusammengesetzt sein mag. In der Mitte des Platindrahtes befindet sich eine Oeffnung, durch welche man einen Träger stecken kann, der oben mit einem Achatschälchen versehen ist. In das letztere bringt man die Spitze, so daß auf diese Weise der Apparat freie Beweglichkeit erhält. Erhitzt man nun die Verbindungsstelle b, während sich in ihrer Nähe der Nordpol eines Magneten befindet, so dreht sich die Kette rechts gegen den Magneten hin und stellt sich nach einigen Oscillationen rechtwinkelig auf ihre vorige Ruhelage. Die Bewegungen geschehen im umgekehrten Sinne, wenn man den Nordpol des Magneten in die Nähe von a oder den Südpol nach b bringt. Befindet sich bei b der Nordpol eines Magneten und bei a der Südpol eines anderen, so dreht sich das Rechteck langsam gegen die Rechte oder Linke, je nachdem b oder a erhitzt wird.



238. Die durch die Wärme hervorgerufenen elektrischen Ströme (thermoelektrische) haben nur eine geringe Spannung und können deshalb keinen bedeutenden Leitungswiderstand überwinden. Aus diesem Grunde nimmt man bei Versuchen über solche Ströme einen Multiplicator, der aus wenigen Windungen eines dicken Drahtes con-

Digitized by Google

struirt ist. Man befestigt dann an die beiden Drahtenden des Multiplicators einen Platindraht, bringt zwischen die beiden Platindrähte einen Draht von dem zu untersuchenden Metalle, z. B. einen Eisendraht, und erwärmt die eine Berührungsstelle zwischen dem Eisen und Platin, während man die andere kalt läßt. Wenn man an die Stelle des Eisendrahtes verschiedene andere Metalle bringt, so erhält man hinsichtlich der Stärke des Stromes sehr ungleiche Resultate. Auch die Richtung des Stromes hängt wesentlich von der Natur der Metalle und dem damit verbundenen Gangunterschiede der Wärme ab. Die eben angeführten Versuche führen, mit gehöriger Sorgfalt angestellt, zu einer thermoelektrischen oder thermomagnetischen Spannungsreihe, in welcher die einzelnen Metalle so auf einander folgen, daß der elektrische Strom bei der Erwärmung einer Verbindungsstelle je zweier Metalle vom nachfolgenden zum voranstehenden geht oder daß jedes Metall, mit einem ihm voranstehenden zu einer thermomagnetischen Kette von der obigen Art verbunden, das Nordende einer im Inneren derselben befindlichen Magnetnadel nach Ost, mit einem ihm nachstehenden verbunden dagegen nach West ablenkt. Diese Reihe ist folgende; man wird bemerken, daß in ihr die Metalle ganz anders auf einander folgen als in der früher aufgestellten elektrischen Spannungsreihe. Wismuth, Nickel, Neusilber, Kobalt, Palladium, Platin, Uran, Kupfer, Mangan, Titan, Messing, Gold, Quecksilber, Blei, Zinn, Rhodium, Iridium, Silber, Zink, Wolfram, Kadmium, Eisen, Arsenik, Antimon. Je weiter die beiden Metalle, welche man zur Construction einer Kette wählt, in dieser Reihe aus einander liegen, desto kräftiger ist die Wirkung. Sind die Metalle nicht rein, so nehmen sie in der aufgestellten Reihe eine andere Stellung ein. Aus diesem Grunde hat man den Thermomagnetismus als Mittel vorgeschlagen, um die Metalle auf ihre Reinheit zu prüfen. Auch gilt jene Reihenfolge nur für eine gewisse Grenze der Temperaturdifferenz der Löthstellen, über diese hinaus ändert sich das gegenseitige Verhalten der Metalle und geht selbst in das entgegengesetzte über.

Die Intensität der Wirkung ist innerhalb gewisser Grenzen stets der Erhitzung der einen Löthstelle oder der Temperaturdifferenz beider proportional.

239. Von Seebeck wurde weiter die Beobachtung gemacht, daß auch eine aus einem einzigen Metalle bestehende Kette durch Erwärmung die Eigenschaft erlangt, auf eine Magnetnadel zu wirken. Es ist dies namentlich bei krystallinischen Metallen, wie beim Wismuth, Antimon u. s. w. der Fall. Man braucht nur eine kleine, leicht

Digitized by Google

bewegliche Magnetnadel über ein Stück Wismuth oder Antimon zu bringen, um auf der Oberfläche desselben Punkte zu finden, welche durch Erwärmung eine Ablenkung veranlassen. Seebeck fand an Ringen aus Wismuth oder Antimon, welche stellenweise erwärmt wurden, in der Regel zwei Punkte, an denen sich die magnetische Wirkung am stärksten zeigte, während an zwei anderen Punkten gar keine bemerklich war. Derartige Punkte können nur durch den Versuch bestimmt werden. Bringt man einen prismatischen oder cylindrischen Wismuthstab in den magnetischen Meridian und erhitzt eines seiner Enden durch die Flamme einer Spirituslampe, so wird eine über oder unter der Stange befindliche Magnetnadel an mehreren Stellen abgelenkt, wenn man die Stange allmälig um ihre Axe dreht. Dabei haben je zwei wirksame Stellen einen Punkt zwischen sich, von dem keine Wirkung ausgeht. Wahrscheinlich rühren diese Erscheinungen von einer Ungleichheit in der krystallinischen Structur der betreffenden Körper her, eine Ungleichheit, welche keine gleichmäßige Fortpflanzung der Wärme nach allen Seiten gestattet. Auch bemerkt man in der That beim Wismuth und Antimon verschiedene Krystallisationsweisen, wenn sie beim Erstarren an manchen Stellen schneller als an anderen erkalten. Nach Becquerel's Untersuchungen kann auch durch ein einziges dehnsames Metall eine thermomagnetische Wirkung hervorgebracht werden. Wenn man einen Platindraht zu einer Spirale aufwickelt und die Enden derselben mit den Enden eines Multiplicators verbindet, so entsteht im letzteren eine Ablenkung der Nadel, sobald der Platindraht auf der einen oder anderen Seite der Spirale erhitzt wird. Dasselbe erfolgt, wenn man einen Knoten in den Draht schlingt und ihn in dessen Nähe erhitzt.

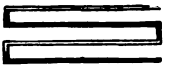
Aus Allem folgt also, daß es für die Entstehung des elektrischen Stromes und des damit verbundenen Thermomagnetismus von Bedeutung ist, daß die Wärme auf beiden Seiten der erhitzten Stelle nicht gleichmäßig fortgepflanzt wird. Es treffen also auch hier zwei Wärmeströmungen unter verschiedenen Umständen zusammen, worin wir früher mit Rücksicht auf den elektrischen Strom die wahrscheinliche Ursache der magnetischen Wirkung eines von Elektricität durchströmten Leiters gefunden haben. Wenigstens kann man der Erfahrung zufolge diese Wirkung mit demselben Rechte dem Wärmeäther als dem Elektricum zuschreiben, da überall eine Lagenveränderung des ersteren stattfindet, wenn ein Leiter vom letzteren durchströmt wird. Wenn nun die Elemente des Wärmeäthers einen Antrieb zu einer Seitenbewegung um die Massentheilchen des Leiters erhalten, während

Digitized by Google

dieſen das Elektricum durchſtrömt, ſo wird wenigſtens die laterale oder transverſale Wirkung des Leiters auf die Magnetnadel begreiflich.

240. Um eine ſtarke Wirkung hervorzubringen, kann man mehrere der zu Anfang beſchriebenen einfachen Ketten zu einer zuſammengeſetzten Kette verbinden, indem man immer zwei ungleichartige Metalle mit einander in Berührung bringt und die 1., 3., ... oder die 2., 4., ... Löthſtelle zugleich erwärmt oder erkaltet. Oerſted und Fourier fanden das Geſetz, daß die Wirkſamkeit einer ſolchen Säule der Anzahl der Elemente, aus denen ſie beſteht, proportional iſt, aber auch zweitens, daß der Leitungswiderſtand im directen Verhältniß mit der Länge der Kette ſteht. Die thermoelektriſche Kette läßt ſich vorzüglich zur Prüfung des Ohm'ſchen Geſetzes gebrauchen, weil ſie ſtets einen Strom von conſtanter Stärke liefert, ſo lange die Temperaturdifferenz der Löthſtellen unveränderlich erhalten wird.

Die empfindlichſte Kette wurde von Nobili conſtruirt. Dieſelbe beſteht aus 35 ſehr feinen Nadeln von Wismuth und Antimon, welche in einer Weiſe, wie die Figur zeigt, zuſammengelöthet ſind. Da ſich die Nadeln nur an den Löthſtellen berühren dürfen, ſo ſind die Zwiſchenräume mit iſolirenden Subſtanzen ausgefüllt, ſo daß das Ganze einen compacten Bündel bildet. An das erſte und letzte Stäbchen, mit denen die Kette endigt, ſind zwei Stifte befeſtigt, welche aus zwei Kupferröhrchen hervortreten. Mit dieſen Stiften werden die Drahtenden eines Multiplicators in Verbindung gebracht. Eine ſolche gebrauchte Melloni zu ſeinem Apparate, mit dem er die Geſetze der ſtrahlenden Wärme erforſchte.



241. Die thermoelektriſchen Ströme bringen auch alle übrigen Wirkungen der früher betrachteten Ströme hervor; ſie erſcheinen als Funken, bewirken Zuckungen und Temperaturerhöhungen und zerlegen Salze und Waſſer. — Eine bemerkenswerthe Beobachtung hat Peltier gemacht; er fand nämlich, daß ein Strom, welcher durch einen aus zwei verſchiedenen Metallen zuſammengeſetzten Leiter geht, bald Wärme, bald Kälte hervorbringt. Die größte Temperaturerhöhung zeigte ſich ſtets da, wo der ſogenannte negative Strom von einem guten Elektricitätsleiter zu einem ſchlechten überging, was leicht einzuſehen iſt, wenn man ſich erinnert, daß der negative Strom nach unſerer Bezeichnungsweiſe der wahrhaft poſitive iſt. Die Temperaturerhöhung nun, welche dieſer Strom bewirkt, muß ohne Zweifel deſto bedeutender ſein, je größer der Leitungswiderſtand iſt, den er auf ſeinem Wege zu überwinden hat. Löthet man dagegen zwei Stäbe

Digitized by Google

aus Wismuth und Antimon zusammen, so sinkt die Temperatur der Luft an der Löthstelle, wenn der Strom vom Antimon zum Wismuth geht. Man kann sich davon überzeugen, wenn man diese thermoelektrische Kette luftdicht durch die Kugel eines Luftthermometers gehen läßt.

242. Man hat die thermoelektrischen Ketten auch zu mancherlei Temperaturbestimmungen gebraucht. Um z. B. die Temperatur eines Ofens oder einer Flamme zu bestimmen, kann man zwei 1/4 Millimeter dicke Platindrähte, von denen der eine mit einem anderen Metalle legirt ist, nehmen, dieselben an einem Ende in einen Knoten zusammenpressen und die beiden anderen Enden mit dem Multiplicator in Verbindung setzen. Die Temperatur ergiebt sich dann aus der Ablenkung der Nadel, sofern dieselbe der Temperaturerhöhung der in die Flamme gebrachten Verbindungsstelle der Drähte proportional ist.

Zur Bestimmung der Schmelzpunkte schwer schmelzbarer Metalle, wie des Silbers, Goldes u. s. w. hat Pouillet ein magnetisches Pyrometer empfohlen, welches aus einem Flintenlaufe mit zwei angelötheten Platindrähten besteht. Die letzteren werden mit einem Multiplicator, der aus 25 Windungen eines schmalen und dünnen Kupferstreifens construirt ist, in Verbindung gesetzt. Bringt man nun die eine Löthstelle dieser Kette in das zu untersuchende Metall, so zeigt die Nadel des Multiplicators durch die Größe ihrer Ablenkung den Schmelzpunkt des Metalles in Graden eines gewöhnlichen Thermometers an.

Zu Temperaturbestimmungen in der Tiefe des Meeres benutzte Becquerel eine einfache Kette aus einem Eisen- und einem Kupferdrahte, die an ihrem einen Ende zusammengelöthet und deren andere Enden mit den Drahtenden eines Multiplicators verbunden waren. Die eine Löthstelle wurde in die Meerestiefe gesenkt, während die Verbindungsstellen der Kette mit dem Multiplicator außerhalb künstlich abgekühlt wurden. Um die Temperatur eines tiefen Brunnens zu bestimmen, wendete Peltier eine Kette an, welche aus einem 42 Meter langen Eisen- und aus einem eben so langen Kupferdrahte bestand. Mit dieser Kette wurde ein Multiplicator verbunden und die eine Löthstelle in den Brunnen gesenkt, während die andere im Zimmer des Beobachters blieb, wo sie in eine Flüssigkeit getaucht wurde, deren Temperatur er so lange steigerte oder verminderte, bis die Nadel im Multiplicator auf den Nullpunkt zu stehen kam. In diesem Falle war ohne Zweifel die Temperatur beider Löthstellen gleich und der Wärmegrad des Brunnens konnte durch ein in die Flüssigkeit getauchtes Thermometer ermittelt werden. Um das Entstehen eines hydroelektrischen

Digitized by Google

Stromes, welcher durch die ungleiche Einwirkung der Flüssigkeit auf die beiden Metalle sich entwickeln könnte, zu vermeiden, kann man die Metalldrähte mit Harz oder Theer überziehen oder nach Peltier bis auf die zusammengelötheten Enden verzinnen und die letzteren in Glasröhrchen hermetisch verschließen. Auf ähnliche Weise suchte Peltier auch die Temperatur der Atmosphäre in verschiedenen Höhen zu ermitteln.

Weiter haben Becquerel und Dutrochet mittelst der thermoelektrischen Kette die innere Lebenswärme von kaltblütigen Thieren und von Pflanzen zu bestimmen sich bemüht. Sie bedienten sich dazu einer Kette von nebenstehender Form. Ein Eisendraht ist an seinen Enden mit zwei gleichlangen Kupferdrähten zusammengelöthet. Die eine Löthstelle wurde einige Linien tief in den Körper des lebenden Thieres, z. B. eines Insectes, gesenkt, die andere aber in den Körper eines durch heißes Wasser getödteten Thieres von derselben Art und Größe. Beide Thiere befanden sich in einer Glasglocke, deren Luft durch Wasserdunst gesättigt war, um die Abkühlung der Körper durch die Verdunstung zu verhindern.

Der mit dem Kupferdrahte verbundene Multiplicator zeigte dann durch den Ausschlag der Nadel die Temperaturdifferenz zwischen beiden Löthstellen an. Auf ähnliche Weise wurde bei Pflanzen verfahren. Nach diesen Untersuchungen haben auch die Thiere mit kaltem Blute eine eigene, von der Temperatur der Umgebung unabhängige Lebenswärme. Wenn solche Versuche mit der gehörigen Präcision angestellt werden sollen, so ist natürlich die genaueste Uebereinstimmung in der Stärke und Länge der Drähte und in der Art der Löthung nothwendig. Nach Dutrochet kann man dies prüfen, wenn man die beiden Löthstellen gleichtief neben einander in ein mit Oel gefülltes Gefäß stellt, das etwas über die Temperatur der umgebenden Luft erwärmt ist. Stimmen die Drähte in allen ihren Verhältnissen mit einander überein, so behält die Nadel des Multiplicators ihre Ruhelage bei, im Gegentheile aber nicht.

Digitized by Google

Achtes Kapitel.

Von der thierischen Elektricität.

243. Wenn man sich der verschiedenen Mittel erinnert, durch welche das elektrische Gleichgewicht in Körpern gestört wird, so sieht man wohl, daß es auch in den lebenden Organismen an mannigfachen Veranlassungen zu elektrischen Erregungen nicht fehlen kann. Es ist eine bekannte Erfahrung, daß die Haare der Katzen, Pferde häufig in Folge einer elektrischen Erregung sich abstoßen und selbst Funken geben. Dasselbe beobachtet man mitunter an den Haaren jüngerer Personen.

Bringt man nach Nobili das eine Drahtende eines empfindlichen Multiplicators mit dem Kopfe, das andere mit den Füßen eines lebenden oder frisch getödteten Frosches in Berührung, so zeigt die Ablenkung der Nadel einen elektrischen Strom an, welcher von den Füßen nach dem Kopfe geht. Auch scheint jede Muskelcontraction von einer elektrischen Strömung begleitet zu sein. Schneidet man in einen Muskel und verbindet dann die Schnittfläche durch den Multiplicatordraht mit dem äußeren Muskel, so giebt sich ein elektrischer Strom zu erkennen. Auch in Pflanzen ist während ihrer Entwickelung eine Elektricitätserregung zu erwarten, welche Pouillet durch directe Versuche zu bestimmen gesucht hat.

244. Am auffallendsten und merkwürdigsten ist indessen die Elektricitätsentwickelung in einigen Fischen, welche dazu mit besonderen Organen versehen sind. Dahin gehören namentlich der Zitterrochen (raja torpedo), der Zitterwels (silurus electricus) und der Zitteraal (gymnotus electricus). Der erste findet sich im mittelländischen Meere und im atlantischen Ocean, der zweite in verschiedenen afrikanischen Flüssen, z. B. im Nil und Niger, der dritte in den Landseen von Südamerika. Diese Fische haben die Eigenschaft, daß sie nach Willkür elektrische Schläge ertheilen können, welche denen einer Leidner Flasche oder Volta'schen Säule ähnlich sind.

Das elektrische Organ des Zitterrochens liegt auf beiden Seiten des Körpers, ganz nahe unter der Oberfläche. Es besteht aus einer großen Anzahl rundlicher Säulchen, welche in der Richtung vom Bauche zum Rücken vertical gestellt sind. Diese Säulchen sind aus einer Menge feiner Blättchen, welche durch gallertartige Schleimschichten von einander getrennt sind, zusammengesetzt. Die Aehnlichkeit dieses Organs mit der Volta'schen Säule ist nicht zu verkennen.

Digitized by Google

Dasselbe ist mit Blutgefäßen und Nerven reichlich versehen, welche letzteren aus vier starken, dem Centralsysteme entspringenden Bündeln hervorgehen. Das elektrische Organ des Zitteraals ist im Wesentlichen ebenso eingerichtet, nur liegt es in dem Schwanze desselben, welcher gegen den übrigen Theil des Körpers ungewöhnlich lang ist. Auch liegen hier die Säulchen in der Richtung des Schwanzes und stehen nicht, wie beim vorigen Fische senkrecht. Wegen der großen Ausdehnung, welche das elektrische Organ des Zitteraals hat, ist dieser im Stande, sehr starke Schläge zu ertheilen, welche nach Humboldt im Maximum der Wirkung selbst ein Pferd zu tödten vermögen.

245. Die von diesen Fischen entwickelte Elektricität ist mit der Reibungs- und Berührungselektricität durchaus identisch; sie kann durch Leiter fortgeführt und durch Nichtleiter aufgehalten werden. Daher erhält man immer einen Schlag, mag man nun den Fisch unmittelbar mit den Händen oder mit einem Metallstabe berühren; dagegen spürt man nichts, wenn man ihn mit einem trockenen Holz- oder Glasstabe anfaßt. Der elektrische Schlag kann auch durch eine Reihe von Personen geleitet werden, wenn sie sich mit den Händen anfassen und die erste den Rücken, die letzte den Bauch eines Zitterrochens berührt. Auch brachte Linari einen Funken hervor, indem er den Strom von dem Bauche zu dem Rücken des Fisches vermittelst Drähte leitete, welche in einer mit Quecksilber gefüllten Vförmigen Glasröhre einander dergestalt zugekehrt wurden, daß sie die Oberfläche des Quecksilbers eben berührten.

Um die Elektricität des Zitteraales genauer zu untersuchen, gebrauchte Faraday zwei sattelförmig gebogene Kupferplatten, die er in einer bestimmten Entfernung von einander auf den Rücken des Fisches setzte. Auf jeder Platte befand sich noch eine ähnlich geformte Decke aus Federharzpappe, welche sich mit ihren einwärts gebogenen Rändern fest an den Fisch schmiegte. Die Kupferplatten wurden nun mittelst Kupferdrähte, welche von dem Wasser, worin sich der Fisch befand, durch einen Firnißüberzug isolirt waren, mit den Drahtenden eines Multiplicators verbunden. Der Ausschlag der Nadel zeigte einen Strom an, welcher von dem Schwanze des Fisches durch den Draht zum Kopfe ging. Faraday zersetzte durch diesen Strom Jodkalium und machte eine Stahlnadel magnetisch, indem er sie in einen Federkiel legte, auf den ein 10 Fuß langer, übersponnener Kupferdraht gewunden war, dessen Enden mit jenen Kupferplatten in Verbindung standen. Schönbein befestigte bei seinen Versuchen über die elektrische Wirkung des Zitteraals an die Enden der beiden Drähte, von

Digitized by Google

denen der eine mit dem auf den Kopf, der andere mit dem auf den Schwanz gesetzten Kupfersattel verbunden war, zwei Goldblättchen, welche in einer gewissen Entfernung von einander in eine Glasglocke herabreichten. Zwischen diesen Blättchen sprang ein Funke über, durch welchen sie verbrannt wurden. Einen ähnlichen Versuch stellte Matteuci mit dem Zitterrochen an, indem er eine Metallplatte auf dem Rücken, eine andere an dem Leibe des Fisches anbrachte. So oft der letztere gereizt wurde, sprang ein Funke zwischen zwei Goldblättchen über, welche mit den Platten in Verbindung standen.

Druckfehler.

(Die mit * bezeichneten bittet man vor dem Lesen zu verbessern.)

Seite 41 Zeile 19 von unten statt $\cos\alpha$ l. $-\cos\alpha$ *

" 90 in der Anmerkung Zeile 7 statt $\frac{M}{a}\int x^2 dx$ l. $\frac{M}{l}\int x^2 dx$.

" 100 statt i in der Formel $g = G\left(i - \frac{4\pi^2 r}{gt^2}\right)$ l. 1.

" 156 Zeile 1 von oben statt Röhre l. Ausflußröhre.

" 163 " 11 von unten statt äußere l. innere. *

" 180 " 12 von oben statt 2,3748 l. 1,3748.

" 215 " 21 " statt von dem Ganzen l. an den Grenzen. *

" 232 " 1 " statt die l. diese.

" 257 " 18 von unten statt höheren l. hölzernen. *

" 320 " 3 " statt gleiche l. gleich.

" 490 " 6 " statt feinern l. freiern.

" 401 " 11 von oben statt H:h l. B:b.

" 462 " 17 von unten statt S′ l. P.

Digitized by Google

Sachregister.

A.

Seite

Abdrehen 63
Ablenkung, magnetische 508
Ablenkung der Magnetnadel durch den elektrischen Strom . . . 623
Abplattung der Erde 99
Absorption der Gase 425
" der Wärme 463
" " " durch die Atmosphäre 475
Abstoßung der Elemente 18
" , magnetische 502
" , elektrische . . . 542 547
Achromatismus 275
Accord 192
Actinometer 481
Adhäsion 26
" zwischen flüssigen und gasförmigen Körpern 427
Aequator, magnetischer 509
Aenderung des Aggregatzustandes 402
Aldinisches Sicherheitskleid . . . 484
Alkarazas 435
Ampère'sche Theorie 650
Anion 622
Anode 622
Anziehung der Elemente . . 13—19
" der kleinsten Massentheilchen 24
Anziehung, magnetische 502
" elektrische . . 542. 547
" in die Ferne . . . 31
" elektrischer Ströme . 640
Aräometer 117
Armatur, magnetische 536
Atwood'sche Fallmaschine . . . 77.

Seite

Auflösung 27
Auge 276
Ausdehnung durch die Wärme . 383
" fester Körper . . . 384
" flüssiger Körper . . 389
" gasförmiger Körper 394
Ausflußgeschwindigkeit 153
Ausflußmenge 154
Auslader, Henley'scher 564
Axe eines Hohlspiegels 247
" einer Linse 261

B.

Babinet's Hahn 140
Barometer 130
Barometerprobe 137
Barometrische Höhenmessung . . 144
Batterie, elektrische 563
Beugung der Wasserwellen . . . 172
" des Lichtes 306
Bergkrystall, dessen Lichtbrechung 368
Bewegung 60
" , Mittheilung derselben 67
" , gleichförmige . . . 65
" , beschleunigte 75
" , verzögerte 75
" , auf der schiefen Ebene 83
" der Himmelskörper . 96
Bifilarmagnetometer 518
Bilder ebener Spiegel 243
" der Concavspiegel . . . 249
" der Conversspiegel . . . 250
" der Linsen 266
" , Daguerre'sche 371
Binden der Wärme beim Schmelzen 402
" " beim Verdampfen 434

Digitized by Google

Seite

Blitz 577
Blitzableiter 579
Blitzrad 605
Blitzröhre 579
Bohnenberger's Elektroskop . . . 594
Brechung des Lichtes 251
" der Wärmestrahlen . . 467
" , doppelte 329
" des Lichtes im Prisma 254
" " in zweiaxigen Krystallen 337
Brechungsexponent 252
" der Gase . . 260
Brechungsgesetz 251
Breguet's Thermometer 388
Brennlinie 268
Brennpunkt des Hohlspiegels . . 248
" der Linse 263

C.

Calorimeter 454
Calorimotor, Hare's 597
Camera lucida 287
Camera obscura 288
Capacität für Wärme 452
Capillarität 121
Centralbewegung 92
Centrifugalkraft 98
Chemische Wirkungen der Säule . 606
" , deren Theorie 614
" " des Lichts . 370
Chromatische Tonleiter 192
Circularpolarisation 362
" " in Flüssigkeiten 369
Coercitivkraft 504
Cohäsion 11. 24. 28
Combinationstöne 210
Communicirende Gefäße . . . 111
Compensationspendel 388
Compensationsstreifen 388
Complementäre Farben 270
Concavspiegel 247
Condensation der Dämpfe . . . 412
" " der Gase 420
Condensator, elektrischer . . . 567
" der Dampfmaschine 442
Conische Refraction 339
Constante Kette 597
Contactelektricität 583
Converspiegel 250
Curven, magnetische 532

D.

Daguerreotyp 372
Dampf 406
" , Anwendung desselben . . 438
Dampfmaschine 442
Daniell's Hygrometer 431

Seite

Dauer des Lichteindruckes . . . 283
Declination, magnetische . . . 508
Diathermansie 466
Diathermanität 466
Dichroit 341
Dichtigkeit 44
" der Luft 399
" der Gase 401
" des Wasserdampfes . . 414
" verschiedener Dämpfe . 418
Dichtigkeitsmaximum des Wassers 393
Differentialthermometer 381
Diffusion der Gase 425
Digestor, Papin'scher 422
Dispersion 273
Donner 578
Doppelspath 329
Drehwage, magnetische 523
" , elektrische 548
Dreiklang 192
Druck einer Flüssigkeit nach allen Richtungen 105
" " auf den Boden 106—108
" " auf die Seiten . . 106
Druck der Luft 129
Druckpumpe 150

E.

Ebene, schiefe 57
Echo 183
Elasticität 29
" der Gase 129
Elektricität 540
" , positive und negative . 543
" , galvanische 383
" , durch Wärme . . . 552
" , durch Druck 551
" , atmosphärische . . . 573
" , thierische 690
Elektrisirmaschine 554
Elektrode 622
Elektro-Dynamometer 655
Elektrolyte 622
Elektromagnet 568. 657
Elektrometer 568
Elektromotorische Kraft 586
Elektrophor 569
Elektroskop 541
Emissionstheorie des Lichtes . . 304
Endosmose 128
Erdbeben 480
Erdtrombe 578
Erdwärme, innere 478
Erkaltung, ihre Gesetze 472
Erleuchtung 240
Erschütterung durch Elektricität . 563
Erwärmung durch die Sonne . . 474
" durch den Druck . . 487

Digitized by Google

Seite

Erwärmung durch Reibung . . 488
" durch Elektricität . . 605
" durch den Lebensproceß 485
Exosmose 128
Expansivkraft des Dampfes 407—412

F.

Fall, freier 76
", über eine schiefe Ebene . . 83
", durch die Sehne eines Kreises 83
", in einem widerstehenden Mittel 103
Fallmaschine, Atwood'sche . . . 77
Farbenspectrum 269
Farbenringe, Nobili'sche . . . 609
", Newton'sche . . . 322
", isochromatische . . 357
", zweiaxiger Krystalle . 359
Farbenzerstreuung 273
Farben dünner Plättchen . . . 321
", complementäre 270
Färbung der Linsengläser . . 275
Fernröhre . . . . . 295—299
Fernsichtigkeit 278
Festigkeit 60
Feuchtigkeit der Luft 430
Feuerspritze 150
Figuren, Lichtenberg'sche . . . 558
Fische, elektrische 690
Flaschenzug 56
Flasche, Leidner 563
", Lane'sche 566
Flamme 485
Fliehkraft 98
Flötenorgelpfeife 204
Focus 248. 263
Frauenhofer'sche Linien 271
Franklin'sche Tafel 560
Fresnel'sche Linsen 265
Fresnel'sches Parallelopiped . . . 366
Funkeln der Sterne 260

G.

Galvanismus 583
Galvanometer 625
Galvanoplastik 609
Gehör 221
Geschwindigkeit bei der gleichförmigen Bewegung 66
Geschwindigkeit bei der beschleunigten 75
" über eine schiefe Ebene 83
" des Schalles in der Luft 177
Geschwindigkeit des Schalles in Flüssigkeiten 180
Geschwindigkeit des Schalles in festen Körpern 207
Geschwindigkeit des Lichtes . . . 242

Seite

Geschwindigkeit der Elektricität . 571
Gewicht, absolutes 43
", specifisches . . . 44. 117
Gewichtsthermometer 390
Gewitter 576
Gleichgewicht der Kräfte . . . 36
", stabiles 49
", labiles 49
" flüssiger Körper . . 105
" gasförmiger Körper 129
", bewegliches d. Wärme 489
Goniometer 244
Gravitation 98
Größe der Bewegung 69
Gyrotrop 649

H.

Haarröhrchen 121
Hagel 579
Halbschatten 239
Hauptaxe des Rhomboeders . . 329
Hauptschnitt desselben 330
Hebel 40. 50
Heber 147
Heliostat 246
Heliotrop 246
Heronsball 148
Heronsbrunnen 149
Hindernisse der Bewegung . . . 100
Höfe 320
Hohlspiegel 247
Hochdruckmaschine 447
Holzmann's Thermometer . . . 389
Hören 222
Hufeisenmagnet 537
Hydroelektrisirmaschine 575
Hydrophan 10
Hydrostatik 105
Hydraulische Presse 150
Hydraulischer Widder 161
Hygrometer 431

I.

Imponderabilien 225
Inclination, magnetische . . . 509
Indifferenzpunkt, magnetischer . . 535
Induction durch elektrische Ströme 666
" durch Magnete . . . 671
Interferenz des Schalles . . . 208
" des Lichtes 311
Interferenzprisma 314
Interferenzspiegel 312
Irradiation 283
Isolatoren 541
Isogonische Linien 519
Isoklinische " 519
Isothermische " 477

Digitized by Google

K.

Seite

Kältemischung 494
Kation 622
Kehlkopf 218
Keil 57
Kepler's Gesetze 95
Kernschatten 239
Kette, galvanische 596
" , einfache 596
" , zusammengesetzte 589
Klangfiguren 186
Knotenlinien 186
Kochen 421
Kohlensäure, flüssige 420
Kräfte 19. 23. 405
Krystalle, thermoelektrische . . . 552
" , doppeltbrechende einaxige 330
" , " zweiaxige 337
Kryophor 435
Kurzsichtigkeit 278

L.

Ladungssäule 592
Längenschwingungen der Luft . . 173
" der Saiten . 193
" der Stäbe . 195
Latente Wärme der Flüssigkeiten . 436
" der Dämpfe . . 437
Leidenfrost'scher Versuch . . . 423
Leidner Flasche 563
Leiter der Elektricität . . . 541
" der Wärme 469
Leitungsfähigkeit für Elektricität . 630
" für Wärme . . 470
Leuchtkraft brennender Körper . . 485
Licht 238
" , elektrisches 557. 560
Lichtbogen zwischen Kohlenspitzen . 606
Lichtbilder 371
Lichtstärke 240
Linsen 261
" , Sammellinsen 264
" , Zerstreuungslinsen . . . 265
" , achromatische 275
" , aplanatische 275
Locomotive 448
Loupe 289
Luftballon 152
Luftdruck 129
Luftpumpe 136
Luftthermometer 398

M.

Magnete, natürliche 501
Magnetismus 501
" , Theorie desselben . 504
Magnetisirung durch Streichen . . 533
" durch elektrische Ströme 656
Magnetisches Magazin 536
Magnetische Wirkungsgesetze . . 522
Magnetometer 512
Mariotte'sches Gesetz 134
Mariotte'sche Flasche 157
Maschinen 50
Masse 43
Materie, Bildung derselben . . 12
Maximum der Spannkraft . . . 412
Maximumthermometer 383
Melloni's thermoelektrischer Apparat 460
Meridian, magnetischer 508
Messung der Spannkraft der Dämpfe 407
" des elektrischen Stromes 627.634
Metacentrum 116
Mikrometer, Rochon's 336
Mikroskop, einfaches 289
" , zusammengesetztes . . 290
Minimumthermometer 383
Mittellinie zweiaxiger Krystalle . 337
Mittelpunkt des Druckes . . . 109
Moment, statisches 40
" der Trägheit 88
Monochord 191
Multiplicator, elektrischer . . . 625

N.

Nachbilder, farbige 285
Nachwirkung auf der Netzhaut . . 284
Nadel, elektrische 541
Nebensonne 321
Neigung, magnetische 509
Nordlicht 582

O.

Objectiv für Mikroskope 290
" für Fernröhre 295
Ocular " 291
Ohm'sches Gesetz 601
Ohr 221
Orgelpfeife 204

P.

Parallelogramm der Kräfte . . . 36
Parallelopiped, Fresnel'sches . . 366
Pendel 84
Photographie 371
Physiologische Wirkungen des elektrischen Stromes 604
Piezometer 492
Pole, magnetische 502
" , " , der Erde . . 509
" , der Volta'schen Kette . . 591
Polarisation des Lichtes 341

Digitized by Google

Seite

Polarisationsapparat 343
Polarisationswinkel 345
Polarisationsebene 343
Polarisation der Wärmestrahlen . 468
Polariskop 361
Porosität 10
Prisma, Nicol'sches 350
" , Rochon'sches 336
Psychrometer 432
Pumpe 149
Pyrometer 382
Pyrophor 482

Q.

Quantität der Bewegung . . . 69
Quadrantenelektrometer 558
Quadrantenthermometer 388
Quellentemperatur 478
Queckfilberthermometer 379
Querschwingungen der Saiten . 184
" der Stäbe . . 184

R.

Rad an der Welle 54
Rad, Segner'sches 160
" , Barlow'sches 639
Räder, gezahnte zur Bestimmung der Schwingungszahl der Töne 212
Reaction der Elemente 15
" des ausströmenden Wassers 159
Reflexion der Wellen 182
" des Schalles 183
" des Lichtes 242
" , totale 254
" der Wärme 464
Regulator an der Dampfmaschine 444
Reflexionsgoniometer 244
Reibung 101
Reibungscoefficient 101
Reibzeug der Elektrisirmaschine . . 554
Resonanz 217
Resonanzfiguren 218
Resultirende 37
Reversionspendel 90
Rolle 54
Rotation des Magneten um den Strom 637
Rotation des Stromes um den Magneten 638
Rotation des Magneten um seine Axe 640
Rotation des Magneten über einer Kupferscheibe 679
Rotationsmaschine, magnetoelektrische 674
Rückschlag 578

S.

Seite

Saiten, gespannte 185
Sammellinse 264
Saugpumpe 149
Säule, trockne 592
" , Volta'sche 589
Schall 173
Schatten 239
Schiefe Ebene 57
Schieberventil 445
Schmelzen 402
Schmelzpunkte 403
Schnellwage 54
Schraube 58
Schweben der Töne 210
Schwere, allgemeine . . 42. 98. 233
Schwerpunkt 46
Schwimmen 113
Schwingungen, stehende . . 185. 197
Schwingungspunkt 87
Schwungkraft 92
Segner's Rad 160
Sehen 281
Sehweite 278
Sehwinkel 281
Seitenkräfte 36
Seitendruck beim Ausströmen von Flüssigkeiten 158
Seitendruck beim Ausströmen der Gase 165
Sicherheitslampe, Davy's . . . 484
Sicherheitspanzer 484
Sicherheitsröhre 147
Sieden 421
Siedpunkte 423
Siedpunkt des Wassers in verschiedenen Höhen 421
Sinusbouffole 628
Sirene 212
Sonnenmikroskop 294
Spannkraft der Dämpfe . . 407—412
Spannungsreihe, elektrische . . . 587
Specifisches Gewicht . . . 44. 117
Specifische Wärme 452
Spectrum 269
Spiegel, ebene 243
" , sphärische 247
" , cylindrische und conische 251
Spiegelmikroskop 293
Spiegelsextant 245
Spiegelversuch, Fresnel'scher . . 311
Stabilität (Standfähigkeit) . . . 50
Stechheber 148
Stimmorgan 218
Stoß 68
" unelastischer Körper . . . 70
" elastischer Körper 71

Digitized by Google

Seite

Stoßmaschine 73
Stützpunkt 40

T.

Tafel, Franklin'sche 560
Tangentialkraft 93
Tangentenboussole 627
Telegraph, elektrischer 662
Teleskop 295
Temperatur 378
" , mittlere 477
" , des Bodens . . . 478
" , der Quellen . . . 478
" , der Seen und Flüsse 479
" in höheren Luftregionen 476
Temperiren der Töne 193
Thau 430
Theilbarkeit 5
Thermoelektricität 683
Thermoelektrische Kette 684
Thermometer 370
Thermomultiplicator 460
Thermoelektrische Säule 687
Thierische Wärme 486
Tonleiter, chromatische 192
Trägheitsmoment 88
Tropfbare Körper 105. 492
Turmalin 552
Turmalinzange 347

U.

Undulationstheorie des Lichtes . . 300
" der Wärme . 687
Undurchdringlichkeit 9. 29
Unterstützungspunkt 40

V.

Variationen der magnetischen Declination 514
Variationen der magnetischen Inclination 517
Variationen der magnetischen Intensität 518
Verbrennen 482
Verdampfen 406. 421
Verdunsten 429
Vergrößerung bei Mikroskopen 290. 292
" bei Fernröhren 297 – 299
Vertheilung, elektrische . . 543. 546
Verwandtschaft, chemische . . . 20

Seite

Vibrationstheorie 300
Volta'sche Fundamentalversuche . . 583
Volumeter 119

W.

Wage 51
Wärme, specifische 452
Wärmecapacität 452
" der Gase 456
Wärmeerzeugung durch chemische Verbindung 481
Wärmeerzeugung durch den Lebensproceß 485
Wärmeerzeugung durch Verbrennen 482
" , durch Druck . . 487
" , durch Reibung . 488
Wärmestrahlung 462
Wasserwellen 167
Wellenlänge der verschiedenen Töne . 191
" " Farben 317
Wellenberg, Wellenthal 167
Wellenrinne 167
Widerstand des Mittels 103
Winkelgeschwindigkeit 88
Winkelspiegel 244
Wollaston's Batterie 596
Wunderscheibe 284
Wurfbewegung 80
Wurfweite 81

Z.

Zamboni'sche Säule 592
Zauberlaterne 295
Zerreißen 61
Zerbrechen 62
Zerdrücken 61
Zersetzung chemischer Verbindungen durch die Elektricität . . . 607
Zerstreuung des Lichtes 243
" der Farben 272
" der Wärme 464
Zitteraal 690
Zitterrochen 690
Zungenpfeife 206
Zusammendrückbarkeit . . . 8. 20
" der Flüssigkeiten 492
Zusammensetzung der Kräfte . . 33
" der Bewegungen 73
" des weißen Lichtes 268
Zusammenziehung des Wasserstrahles 154
" des Luftstrahles . 164

Druck von J. B. Hirschfeld in Leipzig.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google